

ДОКЛАДЫ БГУИР

Том 23, № 6, 2025

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

Volcheck V., Lovshenko I., Yunik A., Hulikava K., Solovjov Ja. Effect of Silicon Nitride and Silicon Dioxide Passivation Films on the Performance of Off-State Field-Plated AlGaN/GaN HEMT (Волчёк В. С., Ловшенко И. Ю., Юник А. Д., Гуликова Е. А., Соловьёв Я. А. Влияние пассивационных слоев на основе нитрида кремния и диоксида кремния на характеристики AlGaN/GaN-ТВПЭ с полевой обкладкой в закрытом состоянии)	5
Мордачев В. И. Радиочастотный электромагнитный фон, создаваемый системами 5G eMVB на густонаселенных территориях	12
Логунов К. Т. Влияние параметров очистки в высокоплотной плазме аргона на морфологию поверхности стеклянных подложек и характеристики эмиссионного спектра	24
Мармыш Д. Е., Данилова А. С. Статистические методы количественной оценки повреждаемости среды, их численная реализация и анализ сходимости	31
Лушакова М. С., Мадвейко С. И., Тихон О. И. Исследование электрических параметров низкочастотного генератора при формировании комбинированного разряда	39
Шекелевский В. В. Консервативная разностная схема для задач магнитостатики со скалярным магнитным потенциалом	48
Гладинов А. Д., Бойправ О. В., Богуш В. А. Характеристики отражения и передачи многослойных тонкопленочных экранов электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне	56
Михневич С. Ю., Гладун П. И. Выбор алгоритмов постквантовой криптографии для стандартизации и оценки их безопасности	65
Воронов А. Ю., Стемпицкий В. Р. Обнаружение аппаратных троянов в устройствах криптографии с использованием машинного обучения	71
Вишняков В. А., Ивэй Ся. Интеграция блокчейна и файловой системы для конфиденциальности хранения данных	80
Ярмолик В. Н., Мрозек И., Бранцевич П. Ю., Деменковец Д. В., Леванцевич В. А. Метод построения управляемых вероятностных тестов	87
Михневич А. В., Вашкевич М. И. Детектирование бокового амиотрофического склероза на основе акустического анализа голоса с использованием библиотеки openSMILE	96
Косарева А. А. Многомасштабная нейронная сеть для классификации фрагментов гистологических изображений	103
Шмарловский С. А. Перспективы цифровизации избирательного процесса в Республике Беларусь	110

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

Стемпицкий 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 редакции

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

Лабунов 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-Хоразмий, 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 16.12.2025. Формат бумаги 60×84%. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 14,18. Уч.-изд. л. 12,5. Тираж 80 экз. Заказ 207.

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. 23, No 6, 2025

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

Volcheck V., Lovshenko I., Yunik A., Hulikava K., Solovjov Ja. Effect of Silicon Nitride and Silicon Dioxide Passivation Films on the Performance of Off-State Field-Plated AlGaN/GaN HEMT	5
Mordachev V. I. Radio Frequency Electromagnetic Background Created by 5G eMBB Systems on Dense Urban Areas	12
Logunov K. T. The Influence of Cleaning Parameters in High-Density Argon Plasma on the Surface Morphology of Glass Substrates and the Characteristics of the Emission Spectrum	24
Marmysh D. E., Danilava H. S. Statistical Methods of Quantitative Assessment of Material Damageability, Their Numerical Implementation and Convergence Analysis	31
Lushakova M. S., Madveika S. I., Tsikhan O. I. Study of Electrical Parameters of a Low-Frequency Generator During the Formation of a Combined Discharge	39
Shakialeuski V. U. A Conservative Finite-Difference Scheme for Magnetostatics Problems with a Scalar Magnetic Potential	48
Gladinov A. D., Boiprav O. V., Bogush V. A. Reflection and Transmission Characteristics of Multilayer Thin-Film Screens of Electromagnetic Radiation in the Microwave Range	56
Mikhnevich S. Yu., Hladun P. I. Selection of Post-Quantum Cryptography Algorithms for Standardization and Assessment of Their Security	65
Voronov A. Yu., Stempitsky V. R. Detecting Hardware Trojans in Cryptography Devices Using Machine Learning	71
Vishniakou U. A., Yiwei Xia. Integrating Blockchain and File System for Data Privacy	80
Yarmolik V. N., Mrozek I., Brancevich P. Yu., Demenkovets D. V., Levantsevich V. A. Method of Controlled Random Tests Generation	87
Mikhnevich A. V., Vashkevich M. I. Detection of Amyotrophic Lateral Sclerosis Based on Acoustic Voice Analysis Using the openSMILE Library	96
Kosareva A. A. Multi-Scale Neural Network for Classification of Histological Image Fragments	103
Shmarlouski S. A. Prospects for Digitalization of the Electoral Process in the Republic of Belarus	110

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 16.12.2025. Format 60×84 1/8. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times.
Ed.-pr. l. 14,18. Ed.-ed. l. 12,5. Edition 80 copies. Order 207.

Editorial address

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
6, P. Brovki St., Off. 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., Room 329a, 220013, Minsk



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-5-11>

UDC 621.382.323

EFFECT OF SILICON NITRIDE AND SILICON DIOXIDE PASSIVATION FILMS ON THE PERFORMANCE OF OFF-STATE FIELD-PLATED AlGaN/GaN HEMT

VLADISLAV VOLCHECK¹, IVAN LOVSHENKO¹, ANDREI YUNIK²,
KATSIARYNA HULIKAVA², JAROSLAV SOLOVJOV²

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

²*JSC "INTEGRAL" – Manager Holding Company "INTEGRAL" (Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. The effect of Si_3N_4 and SiO_2 passivation films on the off-state breakdown performance of the AlGaN/AlN/GaN high electron mobility transistor with a source- or gate-connected field plate was investigated using TCAD simulations. It was discovered that the breakdown voltage of the field-plated device structure passivated by SiO_2 is noticeably higher compared to Si_3N_4 , which contrasts with the results usually observed for transistors without field plates. It was also determined that the intrinsic stress in Si_3N_4 passivation films of certain thickness (250–300 nm) exerts a significant influence on the breakdown characteristics, with tensile-stressed layers allowing to increase the breakdown voltage. Finally, the device structure with a combined $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ passivation stack and a gate field plate was analyzed.

Keywords: breakdown, electric field, field plate, gallium nitride, heterostructure, high electron mobility transistor, impact ionization, leakage current, passivation, simulation, stress.

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

For citation. Volcheck V., Lovshenko I., Yunik A., Hulikava K., Solovjov Ja. (2025) Effect of Silicon Nitride and Silicon Dioxide Passivation Films on the Performance of Off-State Field-Plated AlGaN/GaN HEMT. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-5-11>.

ВЛИЯНИЕ ПАССИВАЦИОННЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ И ДИОКСИДА КРЕМНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ AlGaN/GaN-ТВПЭ С ПОЛЕВОЙ ОБКЛАДКОЙ В ЗАКРЫТОМ СОСТОЯНИИ

В. С. ВОЛЧЁК¹, И. Ю. ЛОВШЕНКО¹, А. Д. ЮНИК², Е. А. ГУЛИКОВА²,
Я. А. СОЛОВЬЁВ²

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

²*ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. В статье представлены результаты исследования в рамках компьютерного моделирования влияния пассивационных слоев на основе Si_3N_4 и SiO_2 на напряжение пробоя в закрытом состоянии транзистора с высокой подвижностью электронов на основе AlGaN/AlN/GaN с полевыми обкладками, подключенными к истоку или затвору. Выяснено, что напряжение пробоя приборной структуры с полевой обкладкой при использовании пассивационного слоя на основе SiO_2 заметно выше, чем при использовании Si_3N_4 , что контрастирует с результатами, обычно получаемыми для транзисторов без полевых обкладок. Также обнаружено, что внутренние механические напряжения в пассивационных слоях на основе Si_3N_4 определенной толщины (250–300 нм) оказывают существенное влияние на пробивные характеристики, и применение слоев, имеющих механические напряжения на растяжение, может приводить к повышению напряжения пробоя. Проведен анализ характеристик приборной структуры с двойной пассивацией на основе $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ и полевой обкладкой, подключенной к затвору.

Ключевые слова: пробой, электрическое поле, полевая пластина, нитрид галлия, гетероструктура, транзистор с высокой подвижностью электронов, ударная ионизация, ток утечки, пассивация, моделирование, напряжение.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Влияние пассивационных слоев на основе нитрида кремния и диоксида кремния на характеристики AlGaN/GaN-ТВПЭ с полевой обкладкой в закрытом состоянии / В. С. Волчёк [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-5-11>.

Introduction

Since the advent of solid-state electronics, silicon has continued to be the main semiconductor material for power devices. However, standard silicon technology is gradually approaching its fundamental physical and theoretical limits [1]. For that reason, there is an ongoing shift in the development of power devices, with manufacturers now focusing on wide band gap semiconductors. One of these promising materials is gallium nitride (GaN), a representative of unique group-III nitrides. Among the advantages of GaN transistors are low on-state resistance, high breakdown voltage, high operational switching frequency, exceptionally good thermal and radiation stability. One of the most appealing devices for power electronics is high electron mobility transistor (HEMT) based on group-III nitrides [2]. Although GaN HEMT technology has recently made substantial progress [3, 4] there still remain critical problems that must be resolved to transform them to reliable and economically viable devices. It is well established that dangling bonds and other defects on the surface of a (Al,Ga)N heterostructure act as traps. When a large negative gate-source voltage is applied to turn the transistor off electrons are injected from the drain and captured by these surface state in the gate-drain access region. This accumulated negative charge reshapes the electric field distribution along the AlGaN barrier layer and creates a local electric field peak whose magnitude may be above the limit the device can safely withstand. Common techniques to cure surface traps include high-quality passivation and formation of field plates [5]. In this paper, we study the effect of Si_3N_4 and SiO_2 passivation films on the off-state breakdown characteristics of the AlGaN/AlN/GaN HEMT with a source- or gate-connected field plate using TCAD simulations.

Device structure

A two-dimensional representation of the AlGaN/AlN/GaN HEMT augmented with a source-connected field plate is shown in Fig. 1. The device structure consists of a 16 nm thick $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ barrier layer, a 1 nm AlN spacer layer and a 5.2 μm GaN buffer layer deposited on a sapphire substrate and covered by a 2 nm GaN cap layer and by a passivation film. Iron-induced deep-level acceptor trap states with an associated energy of 0.7 eV below the conduction band with a maximum concentration of $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ are introduced into the buffer layer to control the off-state drain current. The source and drain electrodes are set to be ohmic contacts. The workfunction of 4.55 eV is specified to the gate electrode treated as a Schottky contact. This value is chosen so that the off-state drain current would be in a range from 10^{-9} to 10^{-8} A. The lengths of the source and drain electrodes are 1 μm , while the gate length equals to 2 μm . The source-gate and gate-drain access regions are 4.5 and 16 μm respectively. The source field plate is 15.5 μm long.

Since GaN HEMT is a unipolar device the hole transport, generation and recombination processes were fully neglected in our simulations. As to electrons, we employed the Farahmand temperature and composition-dependent low-field mobility model [6]. The spontaneous and piezoelectric components of polarization were calculated for all (Al,Ga)N heterointerfaces. Simulation of avalanche breakdown was performed using the Selberherr impact ionization model [7].

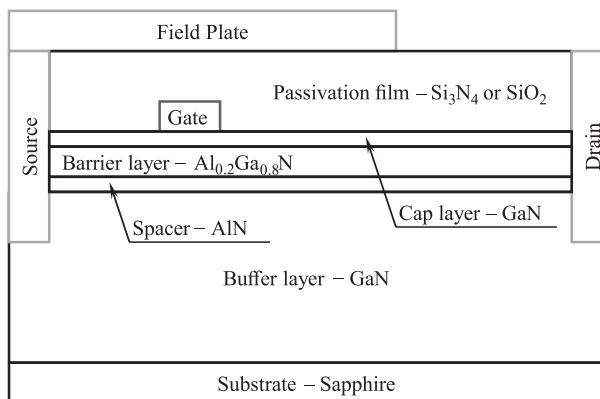


Fig. 1. AlGaN/AlN/GaN HEMT with a source field plate

Results and discussion

In order to investigate the influence of Si_3N_4 and SiO_2 passivation films on the performance of a field-plated AlGaN/AlN/GaN HEMT, a series of DC and off-state breakdown simulations was performed. In the first stage, a conventional device structure featuring a stress-free Si_3N_4 passivation layer but lacking a field plate of any type was studied. Its current-voltage characteristics at a gate-source voltage of -5 V calculated for 50, 200 and 400 nm thick passivation films are presented in Fig. 2. The thicker passivation layer provides a higher breakdown voltage, with the 400-nm film giving a 286 V value, which is larger by 68 V than the value obtained for the 50-nm film. The breakdown voltage grows as the passivation thickness is increased because the electric field weakens at the drain side of the gate. A larger available area allows to spread out the voltage drop along the device structure reducing the peak electric field that can induce breakdown [8].

The effect of the permittivity of the passivation material on the breakdown voltage resembles that of the thickness. When an insulator where the applied voltage tends to propagate more uniformly in general is deposited on a semiconductor, the voltage drop across the latter becomes smoother at the drain side of the gate. If the permittivity of the insulator is increased, the influence of the passivation film becomes more significant [8]. This implies that Si_3N_4 passivation would be a better choice for high-breakdown applications in comparison with SiO_2 since the permittivity of Si_3N_4 equals to 7.4, almost twice as large as 3.9 of SiO_2 [9]. However, several papers [10, 11] claim that the breakdown characteristics of GaN transistors passivated by SiO_2 can surpass those of Si_3N_4 passivated devices.

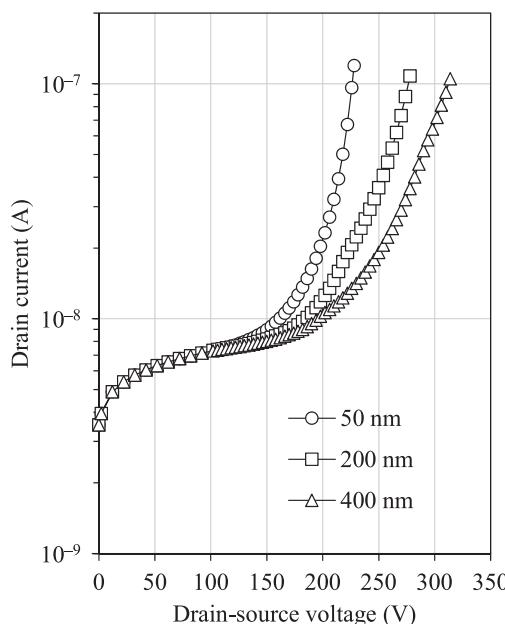


Fig. 2. Current-voltage characteristics of the device structure without a field plate at various Si_3N_4 passivation thickness values

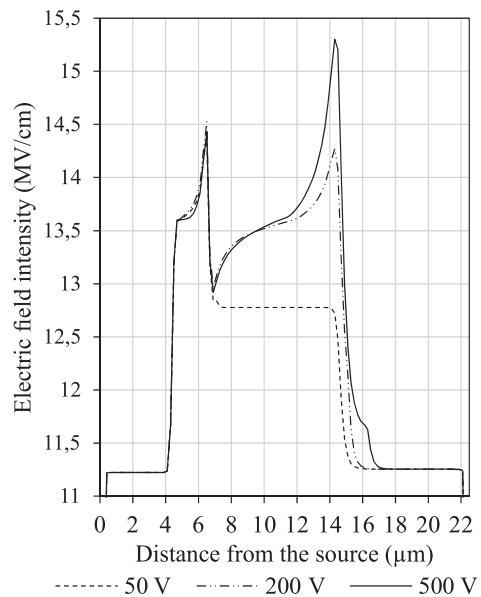


Fig. 3. Electric field distributions along the AlN spacer layer at various drain-source voltages

Figure 3 shows the profiles of the electric field along the AlN spacer layer of the off-state AlGaN/AlN/GaN HEMT with a source-connected field plate at drain-source voltages of 50, 200 and 500 V. The thickness of the Si_3N_4 passivation layer is 250 nm. As it can be seen from Fig. 3, a peak of the electric field forms in the area situated underneath the drain edge of the gate and its intensity remains invariable regardless of the magnitude of the applied voltage. At the same time, as the drain-source voltage is raised a second local maximum of the electric field starts to gradually form in the area below the drain side of the field plate. While no second peak is observed at 50 V, it reaches a value of 15.3 MV/cm at 500 V, greatly exceeding 3.1 MV/cm found near the gate. Similar results [5] were previously reported for gate-connected field plates.

The evolution of the electric field at different bias points is mirrored by the variation of the impact ionization rate, as demonstrated in Fig. 4. At a drain-source voltage of 500 V, the maximum rate becomes as high as $4 \cdot 10^{22} \text{ 1/(cm}^3\text{·s)}$ and the area of the AlN spacer layer situated below the drain side of the field

plate becomes the critical region of the device structure where avalanche breakdown can occur. According to our simulation data, both the electric field and impact ionization rate evolve much more slowly with increasing drain-source voltage if the passivation films are sufficiently thick. In Fig. 5, the effect of the passivation thickness on the breakdown characteristics is presented. When the AlGaN/AlN/GaN HEMT without a field plate is considered, the extension of the Si_3N_4 layer thickness from 50 to 400 nm leads to an increase in the breakdown voltage by around 10 V per every 50 nm. The SiO_2 passivation provides somewhat lower values, giving a breakdown voltage of 250 V for a 400 nm film. The basic physical mechanism that underlies these results was discussed earlier. It is further evident that the addition of a field plate connected to the source contact improves dramatically the off-state performance and enhances the significance of passivation thickness. In case of Si_3N_4 , the breakdown voltage increases by 84.6 V per every 50 nm in a thickness range from 50 to 400 nm, reaching a maximum of 865 V. It is interesting to note that the device structure passivated by SiO_2 shows even better performance as the breakdown voltage increases by 96.7 V per every 50 nm and peaks at 970 V. This contrasts with the results obtained for transistors without field plates. The reason is that SiO_2 being a material with a lower permittivity stores a higher electric field compared to Si_3N_4 and reduces indirectly the field intensity in the AlN spacer layer where the critical region is generated.

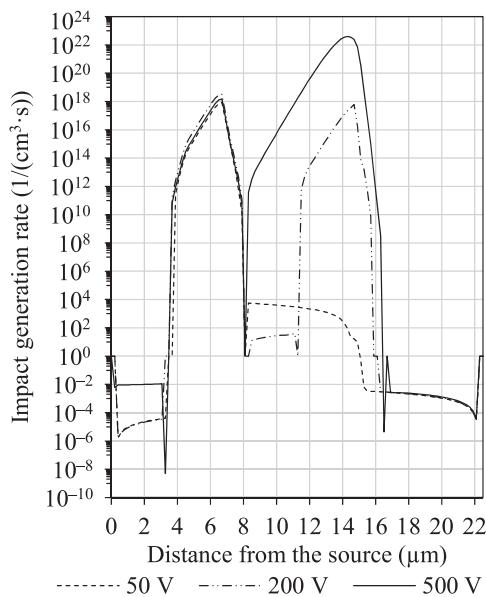


Fig. 4. Impact generation rate distributions along the AlN spacer layer at various drain-source voltages

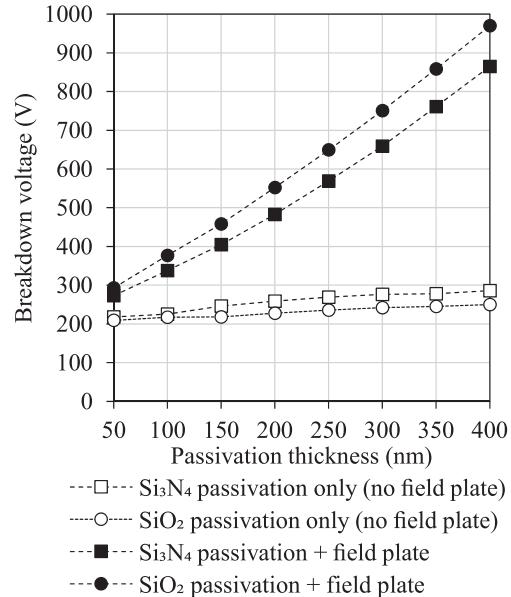


Fig. 5. Effect of the passivation thickness on the off-state breakdown voltage

If a Si_3N_4 passivation film is thick enough it can become intrinsically strained and consequently induce mechanical stress in underlying (Al,Ga)N layers [12]. Depending on deposition conditions, intrinsic, or built-in, stress in Si_3N_4 films can be either compressive (–) or tensile (+). Figure 6 shows the distributions of the longitudinal stress component along the AlN spacer layer of the AlGaN/AlN/GaN HEMT compressively strained by Si_3N_4 passivation films with -0.5 GPa ($-5 \cdot 10^9 \text{ dyn/cm}^2$) intrinsic stress. The thickness of the Si_3N_4 layers is varied from 50 to 400 nm. On the graph, one can notice a remarkable feature – two distributions corresponding to 250- and 300-nm films have distinct spikes located precisely in the region of the device structure where avalanche breakdown is highly probable. As a result, a noticeable dependence (Fig. 7) of the breakdown characteristics on internal stresses in a passivating film with a thickness of 50 to 400 nm is observed. If a 250-nm Si_3N_4 layer with a tensile built-in stress of $+0.5 \text{ GPa}$ is deposited on the top device structure surface it allows to increase the breakdown voltage up to 598 V. On the contrary, the compressive stress of the same magnitude results in a value, which is lower by 62 V. The tensile and compressive intrinsic stresses in the 300-nm Si_3N_4 layer give 639 and 627 V respectively.

The dependence of the leakage current on the intrinsic stress in the Si_3N_4 passivation film at a drain-source voltage of 200 V is shown in Fig. 8. The thickness of the Si_3N_4 layers is again varied from 50 to 400 nm. In most cases, the tensile/compressive built-in stress leads to a higher/lower leakage current.

For example, the AlGaN/AlN/GaN HEMT passivated by a 400-nm tensile film exhibits an off-state current of $7.19 \cdot 10^{-9}$ A and a value of $6.85 \cdot 10^{-9}$ A is obtained for a 400-nm compressive film. The data points corresponding to the 50-nm film look to be inconsistent with the overall tendency. This is because the device structure passivated with such a film is in a state close to avalanche breakdown when biased at 200 V.

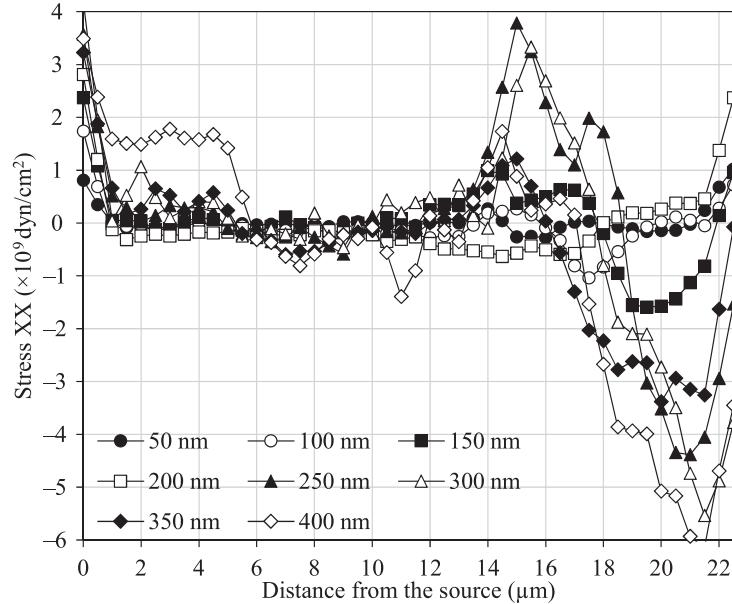


Fig. 6. Simulated distributions of the longitudinal stress component along the AlN spacer layer

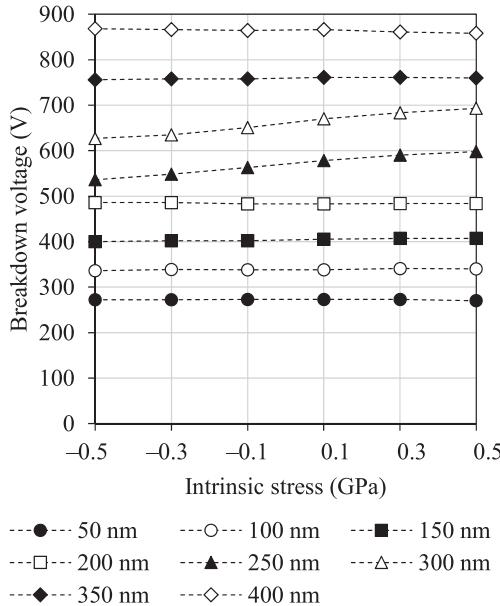


Fig. 7. Effect of the intrinsic stress in the Si_3N_4 passivation film on the off-state breakdown voltage

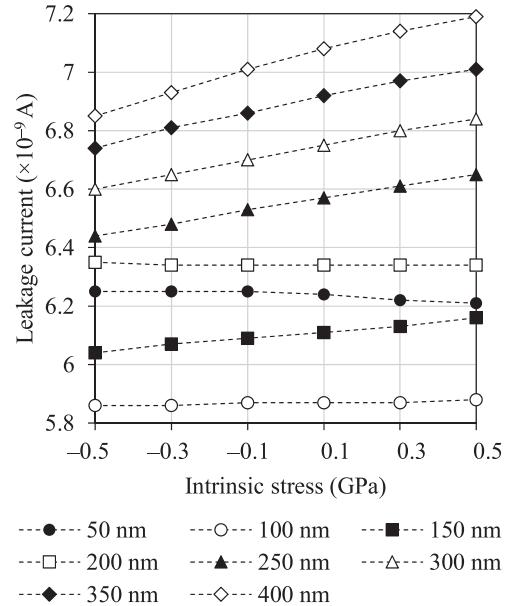


Fig. 8. Effect of the intrinsic stress in the Si_3N_4 passivation film on the off-state leakage current

After completing a series of supplementary simulation runs for the AlGaN/AlN/GaN HEMT with a gate-connected field plate, we found out that both types of field plates provide almost identical characteristics. Provided that the gate-to-drain distance is relatively long (16 μm) and the drain edges of the field plates sit halfway between the gate and the drain, these results seem quite reasonable [13]. In Fig. 9, a comparison of electric field profiles along the AlN spacer layer at various lengths of the gate field plate is presented. Here, we used a bilayer $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ (250/50 nm) passivation stack where the SiO_2 film is inserted between the (Al,Ga)N epitaxial structure and the Si_3N_4 film to improve the poor adhesion of the latter [14]. As clearly seen in Fig. 9, the elongation of the field plate towards

the drain leads to a redistribution of the electrostatic potential in the gate-drain access region causing the electric field peak associated with the field plate end to shift further away from the gate. However, the magnitude of this peak remains unchanged and equals to 14.3 MV/cm. This results in a very small fluctuation of the breakdown voltage within just 13 V when the length of the gate field plate is varied from 5 to 15 μm , as shown in Fig. 10. If the length exceeds 15 μm the field plate end appears to be critically close to the drain contact and the breakdown voltage eventually drops. Moreover, the simulation results correlate fairly well with the experimental data obtained on HEMT test structures.

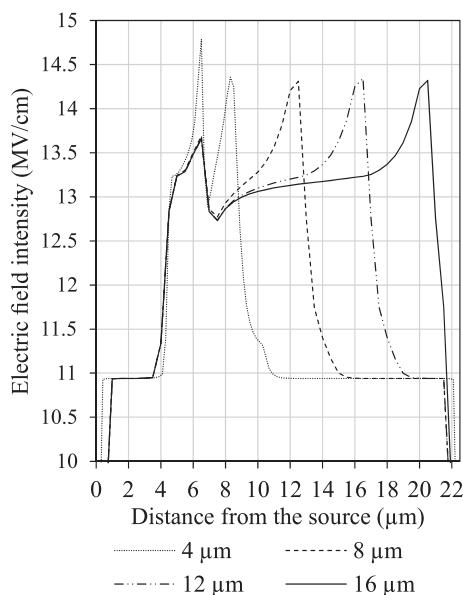


Fig. 9. Electric field distributions along the AlN spacer layer at various gate field plate length values

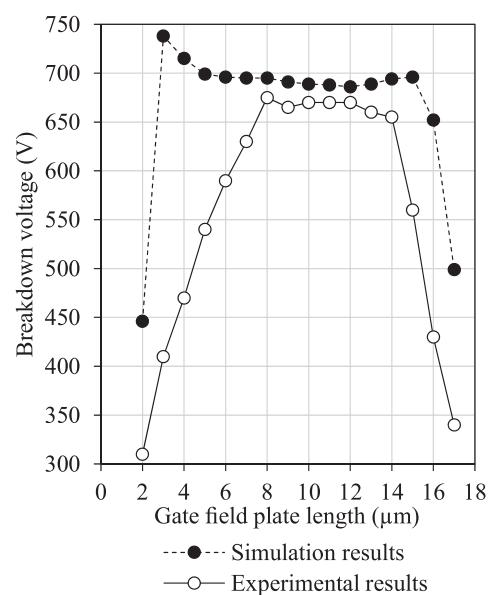


Fig. 10. Variation of the breakdown voltage with the gate field plate length

Conclusions

1. In this paper, we studied the effect of Si_3N_4 and SiO_2 passivation films on the off-state breakdown performance of the AlGaN/AlN/GaN HEMT with a source- or gate-connected field plate using TCAD software. It was shown that the breakdown voltage of the field-plated device structure passivated by SiO_2 is noticeably higher compared to Si_3N_4 (970 vs 865 V for 400 nm thick films). It was determined that the intrinsic stress in Si_3N_4 passivation films of certain thickness (250–300 nm) has a significant influence on the breakdown characteristics, with tensely strained layers allowing to increase the breakdown voltage. We also analyzed the device structure with a combined $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ passivation stack and a gate field plate which made it possible to obtain HEMT test structures with a breakdown voltage above 650 V.

2. This work is funded by grant ОЛНТМ/02-24 from JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” and by grant 3.1 of Belarusian State Program for Scientific Research “Photonics and Electronics for Innovations”.

References

1. Wang Y., Ding Y., Yin Y. (2022) Reliability of Wide Band Gap Power Electronic Semiconductor and Packaging: A Review. *Energies*. 15 (18). <https://doi.org/10.3390/en15186670>.
2. Mendes J. C., Liehr M., Li C. (2022) Diamond/GaN HEMTs: Where from and Where to? *Materials*. 15 (2). <https://doi.org/10.3390/ma15020415>.
3. Tang Y., Shinohara K., Regan D., Corrion A., Brown D., Wong J. (2015) Ultra-High-Speed GaN High-Electron-Mobility Transistors with f_T/f_{\max} of 454/444 GHz. *IEEE Electron Device Letters*. 36 (6), 549–551. <https://doi.org/10.1109/LED.2015.2421311>.
4. Chu J., Wang Q., Jiang L., Feng C., Li W., Liu H., et al. (2021) Room Temperature 2DEG Mobility Above 2350 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ in AlGaN/GaN HEMT Grown on GaN Substrate. *Journal of Electronic Materials*. 50 (5), 2630–2636. <https://doi.org/10.1007/s11664-021-08778-y>.
5. Iwamoto T., Akiyama S., Horio K. (2021) Passivation-Layer Thickness and Field-Plate Optimization to Obtain High Breakdown Voltage in AlGaN/GaN HEMTs with Short Gate-to-Drain Distance. *Microelectronics Reliability*. 121. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114153>.

6. Farahmand M., Movaz M., Garetto C., Bellotti E., Brennan K. F., Goano M., et al. (2001) Monte Carlo Simulation of Electron Transport in the III-Nitride Wurtzite Phase Materials System: Binaries and Ternaries. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 48 (3), 535–542. <https://doi.org/10.1109/16.906448>.
7. Selberherr S. (1984) *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*. Germany, Springer-Verlag Publ.
8. Hanawa H., Onodera H., Nakajima A., Horio K. (2014) Numerical Analysis of Breakdown Voltage Enhancement in AlGaN/GaN HEMTs with a High-k Passivation Layer. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 61 (3), 769–775. <https://doi.org/10.1109/TED.2014.2298194>.
9. Palankovski V., Quay R. (2004) *Analysis and Simulation of Heterostructure Devices*. Wien-NY, Springer-Verlag Publ.
10. Ha M.-W., Lee S.-C., Park J.-H., Her J.-C., Seo K.-S., Han M.-K. (2006) Silicon Dioxide Passivation of AlGaN/GaN HEMTs for High Breakdown Voltage. *2006 IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's*. <https://doi.org/10.1109/ISPSD.2006.1666098>.
11. Cho S.-J., Wang C., Kim H.-Y. (2012) Effects of Double Passivation for Optimize DC Properties in Gamma-Gate AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistor by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition. *Thin Solid Films*. 520 (13), 4455–4458. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.02.055>.
12. Jeon C. M., Lee J.-L. (2005) Effects of Tensile Stress Induced by Silicon Nitride Passivation on Electrical Characteristics of AlGaN/GaN Heterostructure Field-Effect Transistors. *Applied Physics Letters*. 86 (17). <https://doi.org/10.1063/1.1906328>.
13. Onodera H., Hanawa H., Horio K. (2014) Analysis of Breakdown Characteristics in Gate and Source Field-Plate AlGaN/GaN HEMTs. *Technical Proceedings of the 2014 NSTI Nanotechnology Conference and Expo, NSTI-Nanotech 2014*. 2, 499–502. <https://doi.org/10.1002/pssc.201510155>.
14. Huang Z., Duan J., Li M., Ma Y., Jiang H. (2024) Effect of SiO₂ Layer Thickness on SiO₂/Si₃N₄ Multilayered Thin Films. *Coatings*. 14. <https://doi.org/10.3390/coatings14070881>.

Received: 28 September 2025

Accepted: 30 October 2025

Author's contribution

Volcheck V. performed simulation runs and prepared the manuscript of the article.

Lovshenko I. analyzed the results.

Yunik A. analyzed the results and prepared the manuscript of the article.

Hulikava K. performed simulation runs and analyzed the results.

Solovjov Ja. carried out the task setting for the study.

Information about the authors

Volcheck V., Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher at the R&D Laboratory “Computer-Aided Design of Micro- and Nanoelectronic Systems” (Lab 4.4), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Lovshenko I., Head of the Lab 4.4, BSUIR

Yunik A., Leading Engineer at the Branch Laboratory of New Technologies and Materials, JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (JSC “INTEGRAL”)

Hulikava K., Engineer at the Branch Laboratory of New Technologies and Materials, JSC “INTEGRAL”

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

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-09
E-mail: vlad.volcheck@bsuir.by
Volcheck Vladislav



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-12-23>

УДК 621.396.218:614.89.086.5

РАДИОЧАСТОТНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ФОН, СОЗДАВАЕМЫЙ СИСТЕМАМИ 5G eMBB НА ГУСТОНАСЕЛЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

В. И. МОРДАЧЕВ

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

Аннотация. Предложена методика анализа и выполнены оценки средних уровней электромагнитного фона в различных конфигурациях типового сценария Dense urban-eMBB 5G диапазонов частот FR1 и FR2 с учетом вклада излучений абонентских терминалов в средние уровни создаваемого радиочастотного электромагнитного фона. Проанализировано необходимое увеличение спектральной эффективности радиоканалов с целью обеспечения безопасной для населения реализации этого сценария, связанной с использованием технологии MIMO и антенн базовых станций, обеспечивающих адаптивное формирование узких лучей в направлении на обслуживаемые абонентские терминалы.

Ключевые слова: сотовая связь, 5G, eMBB, густонаселенная местность, базовая станция, абонентский терминал, точка наблюдения, территориальная плотность трафика, спектральная эффективность, электромагнитный фон.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев, В. И. Радиочастотный электромагнитный фон, создаваемый системами 5G eMBB на густонаселенных территориях / В. И. Мордачев // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 12–23. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-12-23>.

RADIO FREQUENCY ELECTROMAGNETIC BACKGROUND CREATED BY 5G eMBB SYSTEMS ON DENSE URBAN AREAS

VLADIMIR I. MORDACHEV

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

Abstract. A methodology for analyzing and assessing the average electromagnetic background levels in various configurations of a typical Dense urban-eMBB 5G scenario in the FR1 and FR2 frequency ranges is proposed, taking into account the contribution of subscriber terminal radiations to the average levels of generated radio frequency electromagnetic background. The necessary increase in the spectral efficiency of radio channels is analyzed to ensure safe implementation of this scenario for the population, associated with the use of MIMO technology and base station antennas that provide adaptive formation of narrow beams in the direction of the subscriber terminals being served.

Keywords: cellular communications, 5G, eMBB, dense urban area, base station, user's equipment, observation point, area traffic density, spectral efficiency, electromagnetic background.

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

For citation. Mordachev V. I. (2025) Radio Frequency Electromagnetic Background Created by 5G eMBB Systems on Dense Urban Areas. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 12–23. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-12-23> (in Russian).

Введение

Планируемый в [1, 2] рост средней территориальной плотности трафика (Area Traffic Capacity, *ATC*) до 10^7 бит/с/м² в сетях мобильной связи (МС) 5G и до 10^9 бит/с/м² в сетях 6G определяет актуальность разработки практической методики анализа и выполнения оценок ожидаемой интенсивности создаваемого при этом электромагнитного фона (ЭМФ), в первую очередь в местах предоставления услуг eMBB (сверхширокополосной связи) и высокой плотности населения, где интенсивность беспроводного информационного обслуживания максимальна. Подобная методика может быть разработана на основе подхода [3, 4] к анализу статистических характеристик ансамблей электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых пространственно распределенными источниками излучений, используемого при анализе характеристик электромагнитной обстановки (ЭМО), создаваемой излучениями базовых станций (БС) и абонентских терминалов (АТ) сотовой связи, распределенных по территории.

Цель исследований автора – применение подходов [3, 4] к анализу характеристик ЭМО при различных конфигурациях предложенного в [5, 6] типового сценария Dense urban-eMBB 5G в диапазонах частот FR1 (4 ГГц) и FR2 (30 ГГц), а также оценка средней интенсивности и безопасности создаваемого при этом ЭМФ.

Характеристики сценария Dense urban-eMBB 5G

Пространственная топология систем МС 5G в плотной городской застройке при типовом сценарии Dense urban-eMBB 5G, предложенном в [5, 6], предполагает одно- или двухслойное покрытие территорииサイトами макро- и микроуровня (рис. 1). Используемые далее типовые параметры пространственного размещения и излучения БС и АТ из числа рекомендуемых в [5] для различных конфигураций этого сценария приведены в табл. 1.

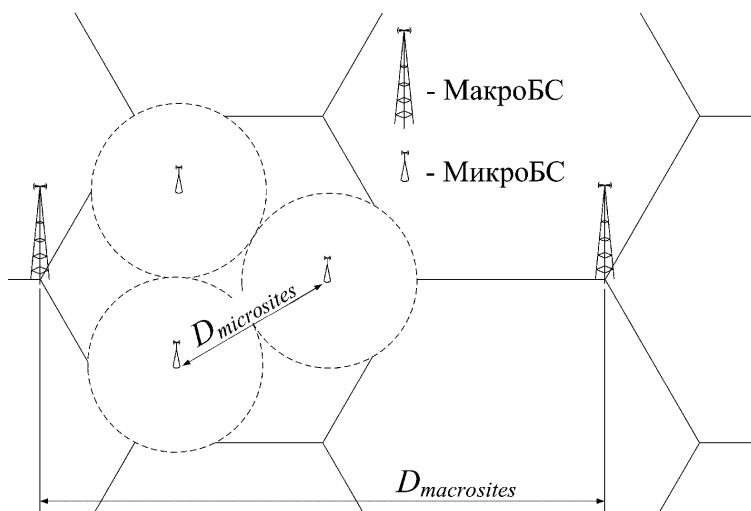


Рис. 1. Пространственная топология сценария Dense urban-eMBB 5G в плотной городской застройке
Fig. 1. Spatial topology of the Dense urban-eMBB 5G scenario in dense urban development

Таблица 1. Типовые параметры пространственного размещения и излучения базовых станций и абонентских терминалов при различных конфигурациях сценария Dense urban-eMBB 5G

Table 1. Typical parameters for the spatial placement and radiation of base stations and subscriber terminals for various configurations of the Dense urban-eMBB 5G scenario

Параметр	Сценарий Dense urban-eMBB для конфигурации		
	А	В	С
Частоты: F_1 – 1-й (макро) слой F_2 – 2-й (микро) слой	1-й слой, $F_1 = 4$ ГГц	1-й слой, $F_1 = 30$ ГГц	1 или 2 слоя (макро + микро). 4 и 30 ГГц доступны в макро- и микрослоях
Высота подвеса антенны БС H_{BS} , м	25	25	25 (для макросайтов) 10 (для микросайтов)

Окончание табл. 1
Ending of Tab. 1

Параметр	Сценарий Dense urban-eMBB для конфигурации		
	A	B	C
Полная излучаемая мощность в радиоканале с полосой частот ΔF в секторе БС P_{TRPBS} , дБм	44 ($\Delta F = 20$ МГц)	40 ($\Delta F = 80$ МГц) ЭИИМ ¹ ≤ 73 дБм	$F_1 = 4$ ГГц: 44 ($\Delta F = 20$ МГц) $F_1 = 30$ ГГц: 40 ($\Delta F = 80$ МГц) ЭИИМ ≤ 73 дБм $F_2 = 4$ ГГц: 33 ($\Delta F = 20$ МГц) $F_2 = 30$ ГГц: 33 ($\Delta F = 80$ МГц) ЭИИМ ≤ 68 дБм
Межсайтовое расстояние (расстояние между БС) $D_{macrosites}$, $D_{microsites}$, м	200	200	Макрослой: 200 Микрослой: случайное размещение БС по территории макросайта
Радиус ² зоны обслуживания (сайта) БС R_{max} , м	150	150	Макрослой: 150
Средняя территориальная плотность БС $\rho_{BS1,2}$, БС/м ²	$\rho_{BS1} = (2-3) \cdot 10^{-5}$	$\rho_{BS1} = (2-3) \cdot 10^{-5}$	Макрослой: $\rho_{BS1} = (2-3) \cdot 10^{-5}$ Микрослой: $\rho_{BS2} = (2-3) \cdot 10^{-4}$
Полоса частот радиоканала ΔF , МГц	10, 20	40, 80	4 ГГц: 10, 20 30 ГГц: 40, 80
Спектральная эффективность радиоканала (средняя) W_{ER} , бит/с/Гц	7,8	7,8	7,8
КНД ³ антенны БС G_{0BS} , дБ	17–20 (секторн.) 24–30 (АФАР ⁴)	17–20 (секторн.) 24–30 (АФАР)	17–20 (секторн.) 24–30 (АФАР)
Коэффициент шума приемника АТ K_{NUE} , ед./дБ	5/7	10/10	4 ГГц: 5 30 ГГц: 10
Высота антенны АТ H_{UE} , м	1,5	1,5	1,5
Количество АТ, АТ/БС	10	10	10
Полная излучаемая мощность АТ ⁵ P_{TRPUE} , дБм	23	23 ЭИИМ ≤ 43 (АФАР)	4 ГГц: 23 30 ГГц: 23, ЭИИМ ≤ 43 (АФАР)
КНД антенны АТ ⁵ G_{0UE} , дБ	0	5	5
Средняя территориальная плотность излучающих АТ ρ_{UE} , АТ/м ²	10^{-4} – 10^{-3}	10^{-4} – 10^{-3}	Макрослой: 10^{-4} – 10^{-3} Микрослой: 10^{-3} – 10^{-2}

¹ЭИИМ – эквивалентная изотропно-излучаемая мощность.

²С учетом необходимости перекрытия зон обслуживания соседних БС при радиусе описанной окружности зоны обслуживания $R_c = 120$ м в макрослой величина радиуса зоны обслуживания принята $R_{max} = 150$ м (или 75 % $D_{macrosites}$) и в микрослой – $R_{max} = 80$ – 100 м; последнее обеспечивает площадь зоны обслуживания БС в микрослой, равную примерно 1/3 от площади зоны обслуживания сектора БС макрослой.

³КНД – коэффициент направленного действия.

⁴АФАР – активные фазированные антенные решетки.

⁵И в БС (конфигурации А, В, С), и в АТ (оциально, конфигурации В, С) планируется применение традиционных ($G_{0BS} = 17$ – 20 дБ, $G_{0UE} = 0$ – 5 дБ) сложных антенных систем в виде многоэлементных АФАР с КНД = 20–30 дБ.

Средняя интенсивность электромагнитного фона, создаваемая излучениями базовых станций

Интенсивность Z_{Σ} [Вт/м²] ЭМФ, создаваемого у земной поверхности электромагнитными излучениями (ЭМИ) радиоэлектронных средств, определяется в виде скалярной суммы плотностей потока мощности Z_1, Z_2, \dots, Z_N N ЭМП, создаваемых этими средствами в точке наблюдения (ТН) [3, 4]:

$$Z_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N Z_n, \quad Z_n \geq Z_0. \quad (1)$$

Средняя интенсивность ЭМФ (1), в свою очередь, связана со средней электромагнитной нагрузкой на территорию (ЭМНТ), создаваемой этими средствами. Используя технологию [3, 4],

выполним анализ ЭМНТ и интенсивности ЭМФ в ТН у земной поверхности, образуемых ЭМП БС МС при различных конфигурациях рассматриваемого сценария 5G.

Для однослойных конфигураций А, В и каждого из слоев конфигурации С при секторной топологии сети N_S , средней территориальной плотности БС ρ_{BS} с числом радиоканалов N_C в каждом секторе и при мощности излучения канальных передатчиков P_{TRPBS} [Вт] электромагнитная нагрузка на территорию B_{BS} [Вт/м²], создаваемая совокупностью БС соответствующего слоя, определяется следующим соотношением:

$$B_{BS} \approx \rho_{BS} P_{TRPBS} N_S N_C. \quad (2)$$

В частности, для данных конфигурации А $\rho_{BS} = (2-3) \cdot 10^{-5}$, $N_S = 3$, $N_C = 1-4$, $P_{TRPBS} = 12,5-25,0$ Вт имеем $B_{BS} \approx 0,001-0,010$ Вт/м². Средняя ЭМНТ связана с суммарной средней интенсивностью ЭМФ, создаваемого в ТН на высоте H_{OP} над земной поверхностью, следующим соотношением:

$$Z_{\Sigma BS} \approx \frac{B_{BS}}{2} \ln\left(\frac{6,6H_{OP}}{\lambda}\right), \quad H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4}. \quad (3)$$

Оценки интенсивности ЭМФ в городской застройке с использованием (3) носят пессимистический характер, поскольку основаны на многолучевой модели распространения радиоволн (PPB) [7], не в полной мере учитывающей их затухание из-за затенения ТН зданиями. Зависимости суммарной средней интенсивности ЭМФ $Z_{\Sigma BS}$ на типовой высоте ТН над поверхностью $H_{OP} = 1,5$ м от ρ_{BS} трехсекторных БС для однослойных конфигураций А, В, отличающихся длиной волны и мощностью ЭМИ БС, при различном числе радиоканалов в секторе N_C приведены на рис. 2.

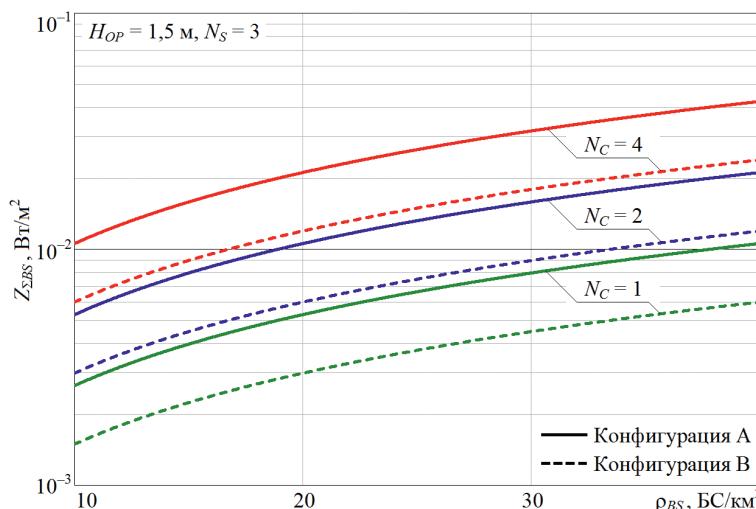


Рис. 2. Зависимость средней интенсивности электромагнитного фона от средней территориальной плотности базовых станций для однослойных конфигураций А, В

Fig. 2. Dependence of the average intensity of the electromagnetic background on the average territorial density of base stations for single-layer configurations A, B

При двухслойной конфигурации С радиосети МС полная излучаемая мощность в радиоканале сектора БС 1-го слоя на порядок превышает таковую во 2-м слое ($P_{TRPBS1} \gg P_{TRPBS2}$). При этом ρ_{BS1} практически на порядок превышает ρ_{BS2} , что делает сопоставимыми уровни средней ЭМНТ (2), создаваемой излучениями БС 1-го и 2-го слоев. Также на соотношение уровней ЭМФ, создаваемого отдельными слоями БС, оказывает влияние и соотношение длин волн λ_1, λ_2 их излучений.

При конфигурации С суммарная средняя интенсивность ЭМФ, создаваемого в ТН на высоте H_{OP} над земной поверхностью излучениями БС обоих слоев, определяется следующим соотношением:

$$Z_{\Sigma BS} \approx \frac{\rho_{BS1} P_{TRPBS1} N_{S1} N_{C1}}{2} \ln\left(\frac{6,6H_{OP}}{\lambda_1}\right) + \frac{\rho_{BS2} P_{TRPBS2} N_{S2} N_{C2}}{2} \ln\left(\frac{6,6H_{OP}}{\lambda_2}\right), \quad H_{OP} \geq \frac{\max\{\lambda_1, \lambda_2\}}{4}. \quad (4)$$

В (4) учтена возможность реализации слоев БС с различным количеством секторов (N_{S1} , N_{S2}) и радиоканалов в каждом секторе (N_{C1} , N_{C2}). Для двухслойной конфигурации С зависимости суммарной средней интенсивности ЭМФ $Z_{\Sigma BS}$ на высоте $H_{OP} = 1,5$ м над поверхностью от $\rho_{\Sigma BS}$ трехсекторных БС, на порядок превышающей территориальную плотность БС верхнего уровня ($\rho_{BS2} = 9\rho_{BS1}$), при различных сочетаниях рабочих частот F_1 и F_2 1-го и 2-го слоев и разном числе радиоканалов N_C в секторе БС приведены на рис. 3.

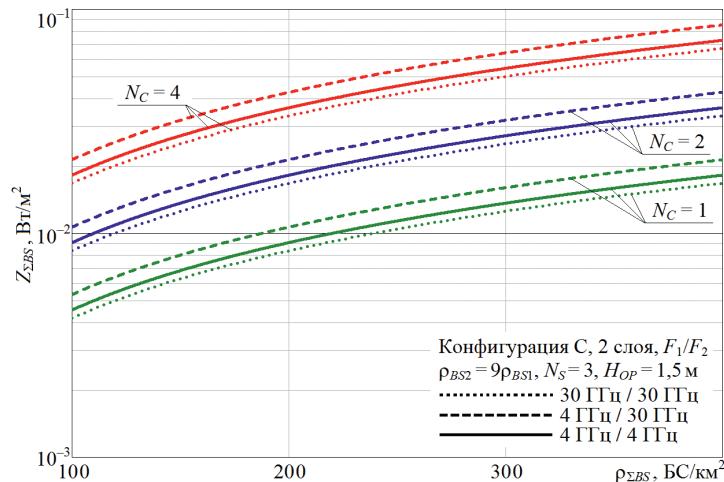


Рис. 3. Зависимость суммарной средней интенсивности электромагнитного фона от суммарной средней территориальной плотности базовых станций для конфигурации С
Fig. 3. Dependence of the total average intensity of the electromagnetic background on the average territorial density of base stations for configuration C

Все кривые на рис. 2, 3 находятся ниже уровня $Z_{\Sigma BS} = 0,1$ Вт/м² (10 мкВт/см²), принятого в качестве предельно допустимого уровня (ПДУ) радиочастотных ЭМП для населения, а также близкого к значениям ПДУ ЭМП для многих видов оборудования объектов критической инфраструктуры [8]. Это в определенном смысле может свидетельствовать об электромагнитной безопасности ЭМП БС при всех конфигурациях сценария Dense-Urban-eMBB 5G с параметрами пространственного размещения и электромагнитного излучения БС, принятыми в [5, 6]. Однако в целом этого недостаточно для заключения об электромагнитной безопасности систем МС 5G, реализующих данный сценарий, в силу следующих обстоятельств:

– значительный вклад в интенсивность ЭМФ, создаваемого системами МС, могут вносить излучения АТ [9], что для полноты анализа рассматриваемого сценария 5G требует оценки суммарной интенсивности ЭМФ, образуемого излучениями и БС, и АТ;

– при типовых параметрах [5, 6] всех конфигураций сценария Dense-Urban-eMBB 5G (табл. 1) уровни средней территориальной плотности мобильного трафика ATC существенно меньше пределов 10^7 – 10^9 бит/с/м², декларируемых в [1, 2] для систем 5G/6G, что требует выполнения анализа средних интенсивностей ЭМФ, ожидаемых при приближении к этим пределам.

Эти выводы справедливы при квазинепрерывных ЭМИ БС (FDD). Использование импульсных сигналов (TDD) требует сравнения интенсивностей ЭМФ с ПДУ импульсных ЭМП.

Средняя интенсивность электромагнитного фона, определяемая с учетом излучений абонентских терминалов

Средняя интенсивность $Z_{\Sigma UE}$ ЭМФ, создаваемого в ТН излучающими АТ с ЭИИМ P_{eUE} , распределенными случайно со средней плотностью ρ_{UE} [АТ/м²] по условной плоскости на высоте H_{OP} , и суммарная средняя интенсивность Z_{Σ} ЭМФ, создаваемого излучениями БС и АТ, определяются следующими соотношениями [9]:

$$Z_{\Sigma UE} \approx \frac{B_{TUE}}{2} \ln \left(\frac{13,2\pi H_{UE}^2}{\lambda^2} \right), H_{UE} \geq \frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi}}, B_{TUE} = \rho_{UE} P_{eUE}, P_{eUE} = P_{TRPUE} G_{0UE}; \quad (5)$$

$$Z_{\Sigma} = Z_{\Sigma BS} + Z_{\Sigma UE},$$

где B_{TUE} – средняя ЭМНТ, создаваемая излучениями АТ, Вт/м².

Следует заметить, что в отличие от ЭМНТ (2), распределяемой по территории достаточно равномерно в силу близкого к равномерному территориальному распределения БС, ЭМНТ, создаваемая излучениями АТ, может быть распределена по территории неравномерно с учетом локального группирования абонентов на различных элементах городской инфраструктуры.

На рис. 4 для однослойных конфигураций А и В приведены расчетные зависимости суммарной средней совокупной интенсивности $Z_{\Sigma} = Z_{\Sigma BS} + Z_{\Sigma UE}$ ЭМФ, создаваемого излучениями БС и АТ, от параметра k (отношение ρ_{UE} к ρ_{BS} трехсекторных БС (ρ_{UE}/ρ_{BS})) при $H_{OP} = 1,5$ м и различном количестве как канальных радиопередатчиков (TR_x), так и радиоканалов N_C в секторе БС.

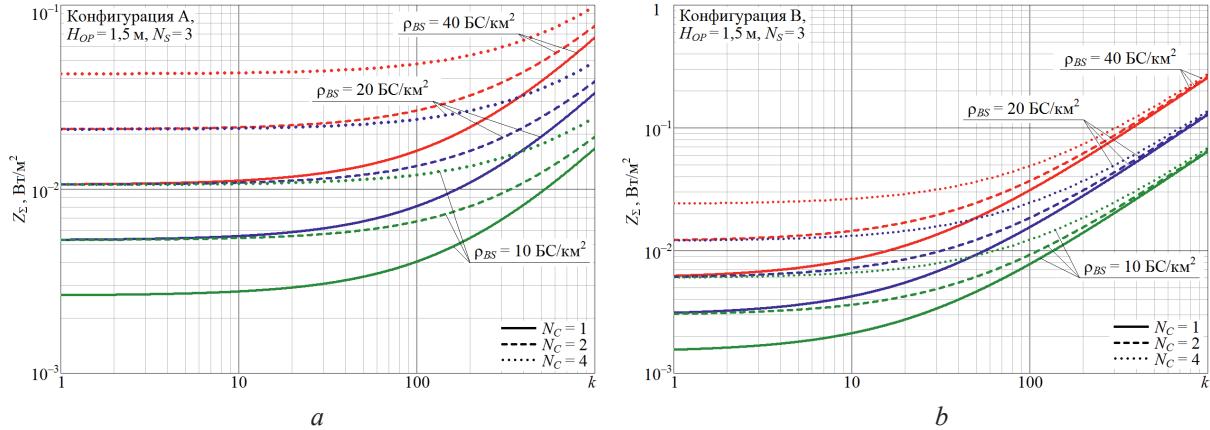


Рис. 4. Зависимость суммарной средней интенсивности электромагнитного фона от параметра k для конфигураций: *a* – А; *b* – В

Fig. 4. Dependence of the total average intensity of the electromagnetic background on the parameter k for configurations: *a* – А; *b* – В

В [5] принято типовое значение $k = 10$, соответствующее равномерному случайному территориальному распределению АТ в каждом секторе обслуживания БС; $k > 10$ соответствует локальному группированию АТ.

На рис. 5 приведены зависимости Z_{Σ} от k для двухслойной конфигурации С при $H_{OP} = 1,5$ м, различных сочетаниях используемых диапазонов частот в макро- и микрослоях, разном числе радиоканалов в секторах БС ($N_{C1} = N_{C2} = 1$ и $N_{C1} = N_{C2} = 4$), при трехсекторной структуре макрослоя ($N_{S1} = 3$) и $N_{S2} = 1$ в микрослое, а также при различной территориальной плотности БС и АТ ($\rho_{BS1} = 10$ и 40 БС/км², $\rho_{\Sigma BS} = \rho_{BS1} + \rho_{BS2} = 10\rho_{BS1}$, $\rho_{UE} = 10k\rho_{BS1} = k\rho_{\Sigma BS}$).

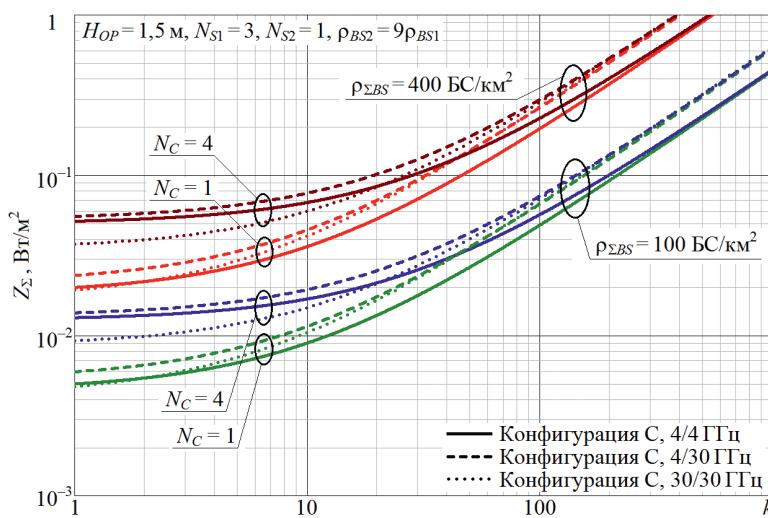


Рис. 5. Зависимость суммарной средней интенсивности электромагнитного фона от параметра k для вариантов конфигурации С

Fig. 5. Dependence of the total average intensity of the electromagnetic background on the parameter k for configuration options C

Анализ кривых на рис. 4, 5 свидетельствует о следующем.

1. Наименьшие средние интенсивности совокупного ЭМФ и опасность их приближения к ПДУ $0,1 \text{ Вт/м}^2$ при локальном группировании АТ характерны для конфигурации А. Даже при $\rho_{BS} = 40 \text{ БС/км}^2$ и четырехканальном обслуживании территории ($N_C = 4$) следует ожидать приближения средней интенсивности совокупного ЭМФ к ПДУ лишь при локальном увеличении на два порядка ($k \approx 10^3$) средней территориальной плотности излучающих АТ (до $\rho_{UE} \approx 0,04 \text{ АТ/м}^2$) в окрестности ТН. При такой концентрации излучающих АТ их вклад при $N_C = 1$ увеличивает среднюю интенсивность совокупного ЭМФ в 8 раз (на 9 дБ), а при $N_C = 4$ – в 2,5 раза (на 4 дБ), что достаточно существенно.

2. При конфигурации В приближение средней интенсивности совокупного ЭМФ к ПДУ $0,1 \text{ Вт/м}^2$ следует ожидать уже при $k = 300$ – 400 и $N_C = 4$ (что соответствует $\rho_{UE} \approx 0,011$ – $0,016$), а также при $k = 800$ и $N_C = 2$ (что соответствует $\rho_{UE} \approx 0,032$) при некотором уменьшении зависимости от N_C с ростом k и ρ_{UE} . Подобная территориальная концентрация АТ на порядок и более увеличивает среднюю интенсивность совокупного ЭМФ, оказывая решающее влияние на ее приближение к опасному ПДУ.

3. В конфигурации С при $\rho_{\Sigma BS} = 400 \text{ БС/км}^2$ следует ожидать приближения средних интенсивностей совокупного ЭМФ к ПДУ $0,1 \text{ Вт/м}^2$ при локальном увеличении ρ_{UE} в окрестности ТН всего в 2–3 раза при $N_C = 4$ и всего в 3–5 раз при $N_C = 1$. При $\rho_{\Sigma BS} = 100 \text{ БС/км}^2$, что меньше заявленного для конфигурации С в [5], это приближение к ПДУ следует ожидать при локальном увеличении ρ_{UE} в окрестности ТН всего в 10–20 раз при слабой зависимости от числа радиоканалов N_C .

4. Существенное влияние территориальной плотности БС на интенсивность ЭМФ наблюдается только при равномерном территориальном распределении АТ; оно существенно уменьшается в местах локальной концентрации АТ и относительно мало влияет на достижение критического уровня территориальной плотности излучающих АТ, при котором интенсивность совокупного ЭМФ приближается к ПДУ.

Таким образом, во всех конфигурациях, особенно в С, следует ожидать существенной зависимости средней интенсивности совокупного ЭМФ от степени концентрации излучающих АТ в окрестности ТН. Однако действующей системой гигиенического нормирования вынужденных рисков воздействия антропогенных радиочастотных ЭМП на население это не учитывается.

Средняя интенсивность электромагнитного фона, определяемая с учетом средней территориальной плотности мобильного (беспроводного) трафика

При идентичности всех БС сети (N_S, N_C с полосой частот ΔF радиоканалов в каждом секторе, $W_{ER} = \text{const}$) и средней территориальной плотности БС ρ_{BS} рассматриваемого уровня средней ATC [бит/с/м²] определяется следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} ATC &= \rho_{BS} W_{ER} \Delta F_{\Sigma} N_S, \quad \Delta F_{\Sigma} = N_C \Delta F, && \text{конфигурации А, В;} \\ ATC &= \rho_{BS1} W_{ER} \Delta F_{\Sigma} N_{S1} + \rho_{BS2} W_{ER} \Delta F_{\Sigma} N_{S2}, \quad \Delta F_{\Sigma} = N_C \Delta F, && \text{конфигурация С.} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В конфигурации С параметры N_{S1} и N_{S2} в 1-м и 2-м слоях могут отличаться.

Зависимости ATC от суммарной ширины полосы частот радиоканалов ΔF_{Σ} каждого сектора БС для однослойных конфигураций А, В и для двух вариантов конфигурации С рассматриваемого сценария 5G при трехсекторной ($N_{S1} = 3$) топологии макрослоя, $W_{ER} = 7,8$ [5] и при различных ρ_{BS1} в макрослоях и ρ_{BS2} в микрослое приведены на рис. 6. Их интерпретация имеет следующие особенности:

– для двухслойной конфигурации С принято, что территориальная плотность БС микрослоя, располагаемых случайно в зонах обслуживания секторов БС макрослоя, в девять раз превышает среднюю территориальную плотность последних ($\rho_{BS2} = 9\rho_{BS1}$);

– полосы частот радиоканалов при всех конфигурациях сценария могут использоваться для электромагнитного излучения как в режиме частотного дуплекса FDD (тогда в другой полосе частот выделяются каналы радиоприема БС), так и в режиме временного дуплекса TDD. Эта особенность не учитывается: полагается, что суммарная ширина полос частот ΔF_{Σ} радиоканалов каждого сектора БС в каждой конфигурации охватывает полосы частот электромагнитного излучения БС со спектральной эффективностью $W_{ER} = 7,8$.

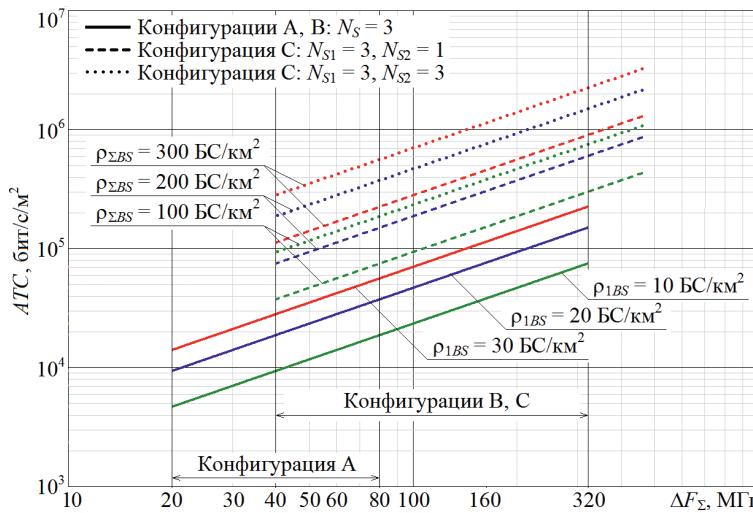


Рис. 6. Зависимость средней территориальной плотности мобильного трафика от суммарной ширины полосы частот радиоканалов в секторах базовых станций

Fig. 6. Dependence of the average territorial density of mobile traffic on the total bandwidth of radio channels in base station sectors

Анализ зависимостей на рис. 6 свидетельствует о том, что при типовых характеристиках [5] рассматриваемого сценария 5G, приведенных в табл. 1, уровень ATC даже в конфигурации С с круговыми диаграммами направленности антенн БС микрослоя и с $N_C = 4$ на каждой БС на порядок ниже декларируемого для 5G предела 10^7 бит/с/м² [2] и может приблизиться к этому пределу лишь гипотетически при трехсекторных БС микрослоя и $\Delta F_\Sigma \rightarrow 1$ Гбит в каждом секторе БС каждого из слоев. Тем не менее интерес представляет и оценка возможных средних уровней ЭМФ, создаваемого излучениями БС при различных конфигурациях рассматриваемого сценария 5G, когда средний уровень ATC приближается к указанному пределу.

Средняя территориальная плотность мобильного трафика (6) у земной поверхности, образуемая излучениями БС, однозначно связана со средней интенсивностью Z_Σ сопутствующего радиочастотного ЭМФ [3, 4].

При известных коэффициенте K_N шума радиоприемников АТ (ед.), ширине полосы частот ΔF и реальной средней W_{ER} радиоканала БС \rightarrow АТ, в m (m – отношение потенциальной и реальной спектральной эффективности) раз худшей по отношению к потенциальной W_{EP} , определяемой в соответствии с известной теоремой Шеннона – Хартли; при длине волны ЭМП БС λ , КНД антенны БС G_{0BS} , радиусе зоны обслуживания БС R_{max} , ограничивающей чувствительностью радиоприема АТ, и среднем уровне ATC , создаваемой БС у земной поверхности, у этой плоскости создается следующая ЭМНТ [3, 4]:

$$B_{BS}(R_{max}, ATC, K_{CC}, W_{ER}, m, \lambda) = \frac{8\pi^2 k T_0 K_N D_\Sigma (2^{mW_{ER}} - 1) R_{max}^2 ATC}{\lambda^2 W_{ER} G_{0BS} G_{0UE}}; \quad (7)$$

$$ATC = \rho_{BS} W_{ER} \Delta F, \quad W_{ER} = \frac{W_{EP}}{m} \approx \frac{\log_2 CNIR_R}{m^2}, \quad (8)$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T_0 – температура окружающей среды, $T_0 = 290$ К; D_Σ – совокупный запас в мощности излучения БС в сети 5G, ед., связанный с необходимостью преодоления внутрисистемных помех, компенсации потерь на затухание радиоволн при проникновении в здания, потерь на замирания при РРВ в «каньонах» городской застройки вследствие многолучевости и дифракции, а также с необходимым запасом в уровне принимающего сигнала АТ для реализации хендовера; $CNIR_R$ – отношение сигнал/(шум+внутрисистемная помеха) (carrier-to-noise plus intrasystem interference ratio) в реальном радиоканале БС \rightarrow АТ.

Используя (3), (4) с (7), (8), исследуем зависимости средней интенсивности ЭМФ, создаваемого излучениями БС на высоте $H_{OP} = 1,5$ м над земной поверхностью при различных конфигурациях рассматриваемого сценария 5G и разных уровнях ATC .

На рис. 7 приведены семейства кривых $Z_{\Sigma BS}(m)$ для конфигураций А (для $K_N = 5$ дБ, $G_{0BS} = 20$ дБ) и В (для $K_N = 10$ дБ, $G_{0BS} = 30$ дБ) при запасе в мощности излучения БС $D_{\Sigma} = 10^4$, $R_{\max} = 150$ м и различных средних уровнях ATC , декларируемых для систем 4G/5G/6G. Зависимости для диапазона 4 ГГц (конфигурация А) получены для антенн БС с КНД = 20 дБ и для $K_N = 5$ дБ, для диапазона 30 ГГц – 30 дБ (АФАР в режиме beamforming) и 10 дБ соответственно. На рис. 7 горизонтальная сплошная красная линия $Z_{\Sigma BS1} = 10$ Вт/м² соответствует «тепловым» ограничениям ICNIRP [10] на интенсивность радиочастотного ЭМФ для населения; горизонтальная красная пунктирная линия $Z_{\Sigma BS2} = 0,1$ Вт/м² – ПДУ ЭМП, принятому в ряде стран с учетом опасности «нетепловых» эффектов воздействия ЭМП на человеческий организм, а также области ПДУ радиочастотных ЭМП для оборудования критической инфраструктуры [8]; горизонтальная красная штрихпунктирная линия $Z_{\Sigma BS3} = 10^{-3}$ Вт/м² соответствует границе области «уровней особых опасений», установленной стандартами строительной биологии развитых стран [11].

На рис. 8 приведены семейства кривых $Z_{\Sigma BS}(m)$ для различных вариантов конфигурации С при запасе в мощности излучения БС в макро- и микрослоях $D_{\Sigma1} = 40$ дБ и $D_{\Sigma2} = 20$ дБ соответственно и различных значениях средних уровней $ATC = ATC_1 + ATC_2$, соответствующих декларируемым пределам для систем 4G/5G/6G. Принималось: соотношение средней территориальной плотности трафика во 2-м и в 1-м слоях $ATC_2/ATC_1 = 3$ (типовыи вариант), $G_{0BS} = 20$ дБ, $R_{\max1} = 150$ м, $R_{\max2} = 100$ м, $G_{0BS1} = 20$ дБ (4/4, 4/30 ГГц), $G_{0BS1} = 30$ дБ (30/30 ГГц).

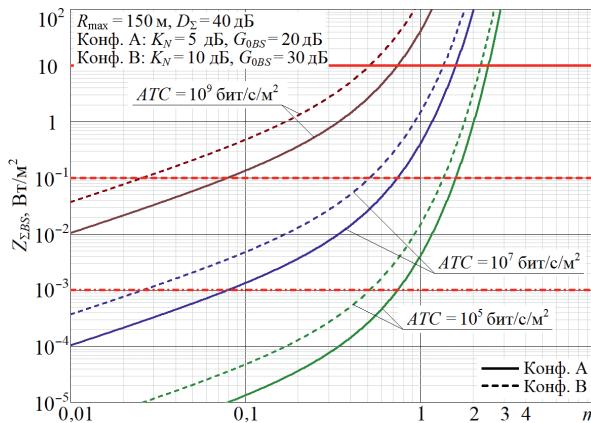


Рис. 7. Зависимость суммарной средней интенсивности электромагнитного фона от параметра m для типовых конфигураций А и В
Fig. 7. Dependence of the total average intensity of the electromagnetic background on the parameter m for typical configurations A and B

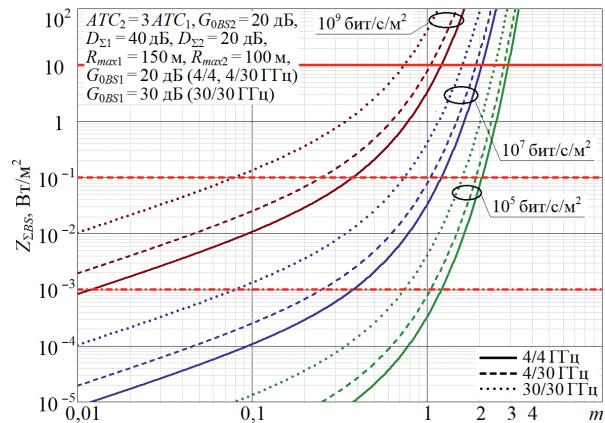


Рис. 8. Зависимость суммарной средней интенсивности электромагнитного фона от параметра m для типовой конфигурации С
Fig. 8. Dependence of the total average intensity of the electromagnetic background on the parameter m for a typical configuration C

На рис. 9 приведены семейства кривых $Z_{\Sigma BS}(m)$ для тех же вариантов конфигурации С с гипотетическим увеличением в десятки раз территориальной плотности БС 2-го слоя при уменьшении почти на порядок радиусов их зон обслуживания и значительном преобладании средней плотности трафика 2-го слоя ($ATC_2/ATC_1 = 100$). Для такой модификации 2-го слоя принято уменьшение КНД антенн и запаса в мощности излучения БС до 10 дБ. Принималось: $G_{0BS} = 10$ дБ, $D_{\Sigma1} = 40$ дБ, $D_{\Sigma2} = 10$ дБ, $R_{\max1} = 150$ м, $R_{\max2} = 20$ м, $G_{0BS1} = 20$ дБ (4/4, 4/30 ГГц), $G_{0BS1} = 30$ дБ (30/30 ГГц).

Выбор диапазона изменения значений параметра m при расчетах графиков на рис. 7–9 обусловлен тем, что в системах 5G технология MIMO обеспечивает выигрыш в спектральной эффективности в 2–8 раз [12], для систем 6G рост спектральной эффективности радиоканалов декларируется в 5–10 раз по сравнению с 5G [1]. В современных радиоканалах без использования технологии MIMO значение параметра m составляет не менее 1,5–2,0 вследствие неидеальности процессов модуляции/демодуляции и кодирования/декодирования, что позволяет ожидать $m \leq 1,0$ в радиоканалах с MIMO в системах 5G и $m \leq 0,1$ в 6G.

Анализ кривых на рис. 7–9 позволяет сделать следующие предварительные выводы.

1. При всех конфигурациях сценария Dense urban-eMBB 5G приближение среднего уровня ATC к 10^5 бит/с/м², декларируемого в качестве предела для систем 4G, может быть причиной

превышения средней интенсивности ЭМФ, создаваемого излучениями БС, ПДУ 0,1 Вт/м². Но при этом увеличение W_{ER} в 2–3 раза за счет применения технологии MIMO способно обеспечить безопасность такого уровня ATC .

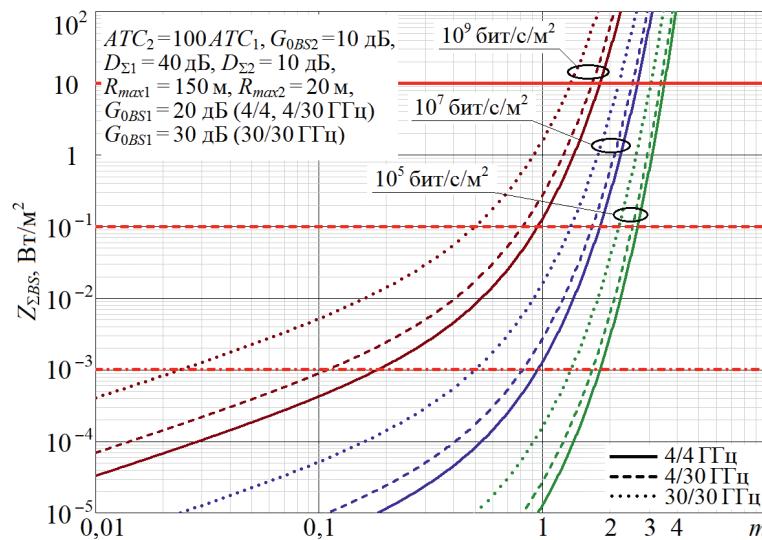


Рис. 9. Зависимость суммарной средней интенсивности электромагнитного фона от параметра m для гипотетической конфигурации С

Fig. 9. Dependence of the total average intensity of the electromagnetic background on the parameter m for a hypothetical configuration C

2. При принятых значениях G_{0BS} , D_{Σ} и приближении ATC к пределу 10⁷ бит/с/м², принятому для систем 5G, условие $Z_{\Sigma BS} \leq 0,1$ Вт/м² выполняется при $m \leq 0,75$ для конфигурации А и при $m \leq 0,5$ – для В. При принятых значениях G_{0BS1} , G_{0BS2} , $D_{\Sigma 1}$ и $D_{\Sigma 2}$ в различных вариантах типовой конфигурации С и $ATC = 10^7$ бит/с/м² условие $Z_{\Sigma BS} \leq 0,1$ Вт/м² выполняется при $m \leq 1,15$ для варианта 4/4 ГГц, при $m \leq 1,0$ – для 4/30 ГГц и при $m \leq 0,75$ – для 30/30 ГГц. Это также вполне достижимо за счет MIMO, принимая во внимание [12].

3. При принятых значениях G_{0BS1} , G_{0BS2} , $D_{\Sigma 1}$ и $D_{\Sigma 2}$ и приближении ATC к пределу 10⁹ бит/с/м², декларируемому для систем 6G [1], выполнение условия $Z_{\Sigma BS} \leq 0,1$ Вт/м² требует $m \leq 0,08$ (конфигурация А), $m \leq 0,015$ (конфигурация В) и $m \leq 0,08$ (конфигурация С, вариант 30/30 ГГц). Обеспечение этого маловероятно даже при очень значительном увеличении спектральной эффективности радиоканалов 6G, прогнозируемом в [1]. Для типовых вариантов конфигурации С с использованием диапазона 4 ГГц, в котором требуются $m \leq 0,4$ (вариант 4/4 ГГц) и $m \leq 0,25$ (вариант 4/30 ГГц), вероятность выполнения условия $Z_{\Sigma BS} \leq 0,1$ Вт/м² при достижении планируемых уровней ATC и W_{ER} более высока.

4. Сравнение зависимостей на рис. 8, 9 иллюстрирует возможности существенного уменьшения интенсивности создаваемого ЭМФ развитием конфигурации С в направлении значительного увеличения территориальной плотности БС 2-го слоя при соответствующем значительном уменьшении их зон обслуживания и мощностей ЭМИ, что способно обеспечить возможность достижения уровня $ATC 10^9$ бит/с/м² в сетях 6G с безопасным уровнем сопутствующего ЭМФ.

5. Эти выводы не учитывают вклада излучений АТ в среднюю интенсивность создаваемого ЭМФ. Однако в силу растущей асимметрии удельного трафика АТ (отношения объемов принимаемой и передаваемой информации), достигающей 100 [13], вклад ЭМП АТ в суммарную интенсивность ЭМФ также будет меньше оценочных значений, соответствующих зависимостям на рис. 4, 5. Тем не менее вклад излучений АТ в среднюю интенсивность ЭМФ при реализации сценария Dense urban-eMBB 5G требует дальнейшего изучения.

6. В анализируемом случае без применения технологии MIMO и других способов значительного увеличения W_{ER} достижение предельных уровней ATC для 5G/6G чревато крайне опасным превышением интенсивности ЭМФ даже «теплового» ПДУ $Z_{\Sigma BS1}$ [10].

В целом приведенные расчетные оценки дают лишь ориентировочное представление об ожидаемой средней интенсивности ЭМФ при реализации сценария Dense urban-eMBB 5G, поскольку

выполнены лишь для конкретного набора типовых значений параметров, предложенных в [5] и входящих в (2)–(8). Тем не менее эти оценки позволяют иллюстрировать как применимость и адекватность приведенной методики анализа, так и возможные уровни электромагнитного загрязнения среды обитания при бесконтрольном широкомасштабном внедрении технологий и услуг МС 5G/6G в плотной городской застройке с высокой плотностью населения.

Заключение

1. Представленные результаты анализа позволяют сделать вывод, что реализация типовых сценариев Dense urban-eMBB 5G с параметрами базовых станций и абонентских терминалов, заявленными в [5, 6], при которых средняя территориальная плотность мобильного трафика на один-два порядка ниже предела 10^7 бит/с/м², декларируемого для систем 5G, безопасна и для населения, и для оборудования критической инфраструктуры. При этом значительный вклад в интенсивность электромагнитного фона могут вносить излучения абонентских терминалов при их локальном пространственном группировании, что требует учета при оценках электромагнитной безопасности подобных объектов, в частности, при их санитарно-гигиенической паспортизации.

2. Параметры сценария 5G позволяют без ущерба для безопасности приблизиться к максимальной территориальной плотности беспроводного трафика 5G путем увеличения числа обслуживающих территорию радиоканалов базовых станций и их спектральной эффективности при использовании технологии MIMO, увеличения коэффициента направленного действия антенн базовых станций за счет: применения как в базовых станциях, так и в абонентских терминалах адаптивных активных фазированных антенных решеток Massive MIMO, обеспечивающих адаптивное формирование узких лучей с коэффициентом направленного действия 20–40 дБ и позволяющих увеличить спектральную эффективность радиоканалов за счет соответствующего увеличения CNR_R в (8); разумного ограничения на минимально необходимом уровне запаса D_Σ в мощности излучения базовых станций; использования, по возможности, более низких рабочих частот, а также повышения реальной чувствительности радиоприема при максимально возможном уменьшении уровней внутрисетевых помех.

3. При анализе безопасности рассмотренного сценария 5G необходимо учитывать, что создаваемая при его реализации интенсивность электромагнитного фона не в полной мере характеризует безопасность систем 4G/5G. Сделанные выше выводы о безопасности сценария 5G справедливы только применительно к технологии FDD, так как для импульсных сигналов TDD 4G/5G, согласно [14], в силу их биологической «агрессивности» необходимо установить существенно более жесткие гигиенические нормативы. Очевидно, что такое же заключение возможно и по отношению к предельно допустимому уровню радиочастотных электромагнитных полей для оборудования критической инфраструктуры, которое может располагаться в плотной городской застройке, поскольку восприимчивость данного оборудования к воздействию радиочастотных электромагнитных полей, как правило, определяется не столько средней, сколько пиковой мощностью этого воздействия.

Список литературы / References

1. 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.
2. IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. *Rec. ITU-R M.2083*. ITU, 2015.
3. Mordachev V. I. (2024) Radio-Frequency Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications. *Radiation Biology. Radioecology*. 64 (3), 305–322 (in Russian).
4. 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).
5. Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020. *Report ITU-R M.2412*. ITU, 2017.
6. The Outcome of the Evaluation, Consensus Building and Decision of the IMT-2020 Process (Steps 4 to 7), Including Characteristics of IMT-2020 Radio Interfaces. *Report ITU-R M.2483*. ITU, 2020.
7. 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 P.1411-6*. ITU, 2012.

8. Mordachev V. I., Svistunou A. S., Sinkevich E. V. (2024) Electromagnetic Safety of 4G/5G Mobile Communications. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 80–91. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-80-91> (in Russian).
9. Mordachev V. I. (2023) Assessment of the Contribution of Radiations of User Equipment to the Anthropogenic Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications. *Doklady BGUIR*. 21 (5), 50–58. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-50-58> (in Russian).
10. Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys.* 2020. 118 (5), 483–524. DOI: 10.1097/HP.0000000000001210.
11. SBM-2008, Standard of Building Biology Testing Methods. *BAUBIOLOGIE MAES, Institute of Biology + Ecology IBN*.
12. *LTE-Advanced (3GPP Rel.12). Technology Introduction. White Paper*. Available: https://www.rohde-schwarz.com/us/applications/lte-advanced-3gpp-rel-12-technology-introduction-white-paper-white-paper_230854-108294.html.
13. *Ericsson Mobility Reports*. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports>.
14. Grigoriev O. A., Zubarev Y. B. (2022) The Effects of Wireless Communication Electromagnetic Energy Influence on Persons: Predictions of the Growth for Conditioned Morbidity, Their Implementation and Problems of Evaluation. *CONCEPCII*. 1 (41), 3–17 (in Russian).

Поступила 17.06.2025

Принята в печать 11.09.2025

Received: 17 June 2025

Accepted: 11 September 2025

Сведения об авторе

Мордачев В. И., канд. техн. наук, доц., зав. науч.-исслед. лаб. «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных 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 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Мордачев Владимир Иванович

Information about the author

Mordachev V. I., 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 Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-24-30>

УДК 539.25; 533.9.082.5

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОЧИСТКИ В ВЫСОКОПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ АРГОНА НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛЯННЫХ ПОДЛОЖЕК И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМИССИОННОГО СПЕКТРА

К. Т. ЛОГУНОВ

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

Аннотация. Исследовано влияние параметров очистки в высокоплотной индуктивно-связанной плазме аргона на морфологию поверхности стеклянных подложек и характеристики ее оптического эмиссионного спектра. Очистка проводилась в диапазоне мощности высокочастотного источника от 100 до 2000 Вт длительностью до 150 с. Морфология поверхности анализировалась методом атомно-силовой микроскопии, а диагностика плазмы обеспечивалась методом оптической эмиссионной спектроскопии. Установлено, что параметры очистки при мощности разряда 300 Вт и длительности 60 с обеспечивают минимальную шероховатость и удаление загрязнений без повреждения поверхности. Спектральный анализ выявил рост интенсивности атомных линий аргона с увеличением мощности и расхода газа, что отражает рост плотности возбужденных частиц и температуры электронов. Полученные зависимости могут быть использованы для автоматизированного контроля и регулировки режимов плазменной очистки в технологических процессах.

Ключевые слова: очистка поверхности, высокоплотная индуктивно-связанная плазма, морфология поверхности, атомно-силовая микроскопия, оптическая эмиссионная спектроскопия.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Автор выражает благодарность Д. А. Котову и Д. Б. Мигасу за ценные рекомендации и замечания в процессе работы над статьей, а также В. А. Лапицкой и О. М. Чернаусик за проведение исследований методом атомно-силовой микроскопии.

Для цитирования. Логунов, К. Т. Влияние параметров очистки в высокоплотной плазме аргона на морфологию поверхности стеклянных подложек и характеристики эмиссионного спектра / К. Т. Логунов // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 24–30. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-24-30>.

THE INFLUENCE OF CLEANING PARAMETERS IN HIGH-DENSITY ARGON PLASMA ON THE SURFACE MORPHOLOGY OF GLASS SUBSTRATES AND THE CHARACTERISTICS OF THE EMISSION SPECTRUM

KONSTANTIN T. LOGUNOV

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

Abstract. The influence of cleaning parameters in high-density inductively coupled argon plasma on the surface morphology of glass substrates and the characteristics of their optical emission spectrum was studied. Cleaning was performed with RF source power ranging from 100 to 2000 W and durations of up to 150 s. Surface morphology was analyzed using atomic force microscopy, and plasma diagnostics were provided by optical emission spectroscopy. It was established that cleaning parameters at a discharge power of 300 W and duration of 60 s ensure minimal surface roughness and contaminant removal without surface damage. Spectral analysis revealed an increase in the intensity of argon atomic lines with increasing power and gas flow rate, reflecting an increase

in excited particle density and electron temperature. The obtained dependencies can be used for automated monitoring and adjustment of plasma cleaning regimes in technological processes.

Keywords: surface cleaning, high-density inductively coupled plasma, surface morphology, atomic force microscopy, optical emission spectroscopy.

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

Gratitude. The author expresses gratitude to D. A. Kotov and D. B. Migas for valuable recommendations and comments during the work on the article, as well as to V. A. Lapitskaya and O. M. Chernausik for conducting research using atomic force microscopy.

For citation. Logunov K. T. (2025) The Influence of Cleaning Parameters in High-Density Argon Plasma on the Surface Morphology of Glass Substrates and the Characteristics of the Emission Spectrum. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 24–30. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-24-30> (in Russian).

Введение

Качество подготовки поверхности подложек является критическим фактором в технологиях модификации поверхности и формирования функциональных покрытий и слоев. Ключевые задачи данного этапа – удаление загрязнений с рабочей стороны подложки и модификация ее морфологии для управления адгезионными свойствами. Для этой цели традиционно применяются химические (влажное травление, органические растворители) и физические (механическая обработка, ультразвук) методы [1, 2], однако им присущ ряд недостатков: риск повторного загрязнения, неоднородность обработки и ограниченная эффективность против стойких загрязнений. В связи с этим методы плазменной и ионно-лучевой очистки привлекают особое внимание, поскольку обеспечивают высокую степень очистки, прецизионное воздействие на структуру поверхности и тонкую настройку параметров, что делает их одним из наиболее эффективных решений для высокотехнологичных производств [3–6].

Учитывая вышеизложенное, следует отметить важность исследований методов плазменной очистки и их влияния на формируемые пленки. В качестве объекта для такого исследования в статье рассмотрены стеклянные подложки. Их очистка проводилась в высокоплотной индуктивно-связанной плазме (ICP) при пониженном давлении. Выбор стеклянных подложек обусловлен их высокой популярностью благодаря низкой стоимости и простоте в обращении. К недостаткам подложек из стекла следует отнести малую теплопроводность, что не позволяет применять их при повышенном нагреве [2]. Также нужно отметить, что плазменная очистка часто считается ограниченно применимой для очистки стекла, поскольку оно будет накапливать заряд и со временем препятствовать дальнейшей очистке [2].

Для точной настройки параметров очистки важно контролировать характеристики плазмы. Одним из наиболее информативных и неразрушающих методов диагностики плазмы является оптическая эмиссионная спектроскопия (ОЭС), позволяющая анализировать качественные и количественные параметры плазмы по ее спектральному излучению в режиме реального времени. Метод ОЭС основан на регистрации и интерпретации атомных и молекулярных спектральных линий, возникающих при переходах возбужденных частиц плазмы на более низкие энергетические уровни. Этот подход обеспечивает определение ключевых характеристик, таких как температура электронов, плотность заряженных и нейтральных частиц, состав плазмы, а также идентификацию активных форм в виде радикалов и ионов. В статье представлены результаты исследования режимов очистки в высокоплотной плазме методом ОЭС, устанавливающие корреляцию между параметрами разряда и спектральными особенностями, что необходимо для оптимизации практического использования плазмы.

Проведение эксперимента

Для проведения исследований в качестве подложек были выбраны квадраты из оптического стекла K8, использующегося в оптических фильтрах и элементах оптических систем. Сторона квадрата составляла 20 мм, а толщина подложки – 0,7 мм. Для оценки значимости влияния очистки на свойства подложек из стекла проводилась очистка методом высокоплотной ICP в вакуумной камере.

Очистка подложек из оптического стекла происходила в экспериментальном комплексе на основе модифицированной ВУ-1БСп. Первоначально система была откачана до базового давления порядка $8 \cdot 10^{-3}$ Па. При проведении исследований расстояние источник–подложка составляло 110 мм, частота питающего напряжения – 13,56 МГц. Для определения влияния режимов очистки на стеклянную подложку применялись следующие режимы работы: мощность высокочастотного (ВЧ) источника варьировалась в диапазоне 100–2000 Вт, время обработки – от 0 до 5 мин, расход газа аргона (Ar) составлял от 2,29 до 4,78 л/ч.

Анализ изменений морфологии поверхности выполнялся методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Сканирование проводилось на площади $10 \times 10 \text{ мкм}^2$. Для исследований была выбрана область в центре образцов. Полученные изображения анализировались с использованием специализированного программного обеспечения для расчета параметров шероховатости, включая среднеарифметическое отклонение высот R_a , среднеквадратическое отклонение R_q , среднюю шероховатость по 10-ти точкам R_z , а также визуализацию 3D-рельефа.

Для исследований высокоплотной ICP использовался спектрометр SOL Instruments S150-2-3648USB, который позволяет регистрировать эмиссионные спектры для последующего анализа. Измерения проводились в перпендикулярно исследуемой плазме со спектральным разрешением $<0,15$ нм в диапазоне от 200 до 980 нм. Идентификация спектральных линий осуществлялась с использованием базы данных Atomic Spectra Database (NIST) [7].

Результаты исследований и их обсуждение

Влияние очистки в высокоплотной плазме было исследовано при помощи АСМ. На рис. 1 представлены снимки морфологии поверхности подложек из стекла до и после обработки. На рис. 1, *a* видно исходное состояние поверхности стеклянной подложки до обработки плазмой, для которой значения шероховатости составили $R_a = 0,717 \text{ нм}$, $R_q = 1,00 \text{ нм}$ и $R_z = 1,88 \text{ нм}$. На рис. 1, *b* представлено изображение после 60 с очистки при мощности разряда 300 Вт и расходе газа 3,23 л/ч.

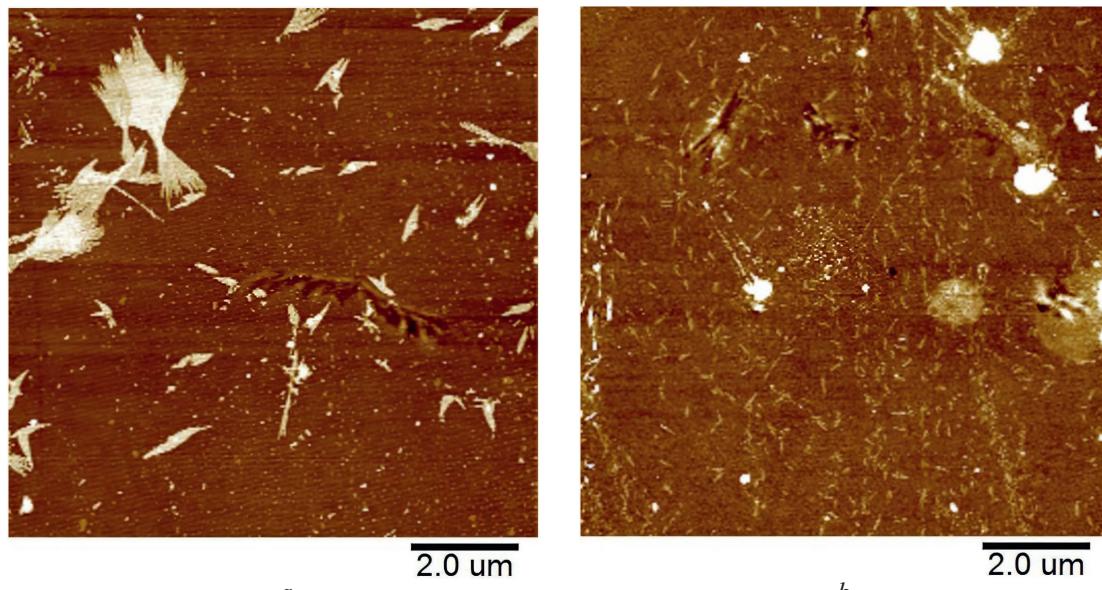


Рис. 1. Снимки морфологии поверхности стеклянных подложек, исследованных с помощью атомно-силовой микроскопии:

a – до обработки; *b* – после очистки в высокоплотной индуктивно-связанной плазме аргона длительностью 60 с

Fig. 1. Surface morphology images of glass substrates examined with the help of atomic force microscopy:
a – before treatment; *b* – after cleaning in high-density inductively coupled argon plasma for 60 s

На рис. 2, *a* приведены зависимости R_a , R_q и R_z от времени очистки в высокоплотной ICP аргона. Измерения проводились при мощности ВЧ-источника 300 Вт. На рис. 2, *b* изображены зависимости данных шероховатостей от мощности разряда, полученные при длительности очистки 1 мин.

Исходя из представленных на рис. 2, *a* результатов, можно сделать вывод, что при длительности обработки до 60 с влияние плазмы на шероховатость поверхности минимально. При дальнейшем увеличении времени (более 60 с) наблюдается рост всех параметров шероховатости, что может быть связано с повреждением изначальной поверхности подложки из оптического стекла. Кроме того, R_z имеет минимальное значение при длительности очистки 60 с, что говорит об устраниении большей части поверхностных загрязнений без затрагивания морфологии поверхности самого стекла.

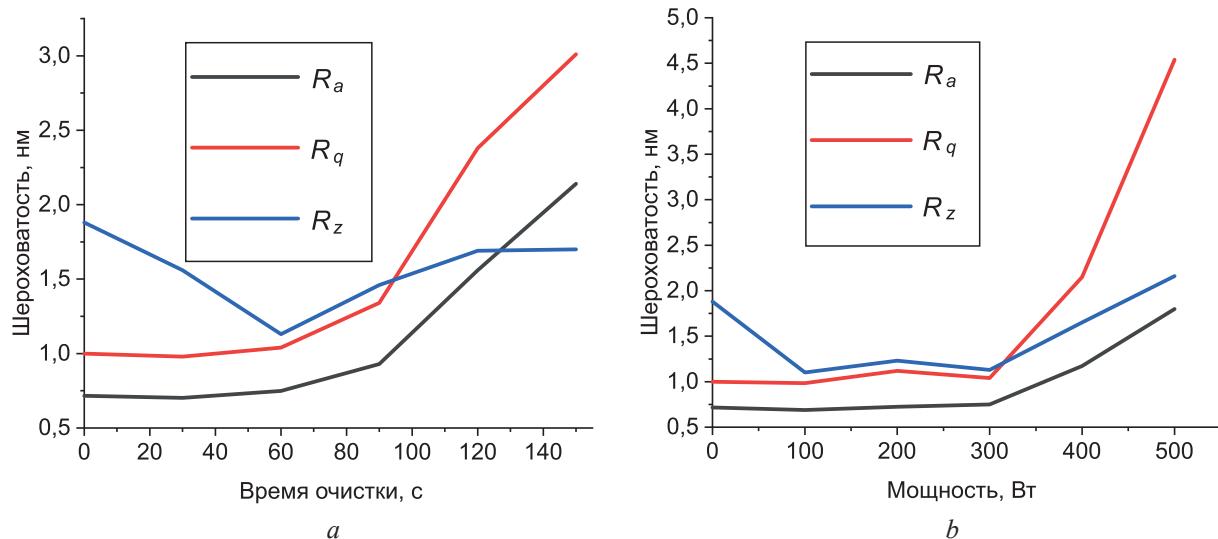


Рис. 2. Зависимость шероховатости подложки из стекла от: *a* – времени очистки; *b* – мощности высокочастотного источника высокоплотной индуктивно-связанной плазмы аргона

Fig. 2. Glass substrate roughness as a function of: *a* – cleaning time; *b* – power of a high-frequency source of high-density inductively coupled argon plasma

Исследование зависимости шероховатости от мощности ВЧ-разряда показало, что при мощности до 300 Вт не наблюдается значительного влияния на шероховатость, за исключением R_z . Влияние очистки на показатель R_z существенно отличается для изначальной подложки и подложки после очистки при мощностях 100–300 Вт, что опять же может указывать на устраниние большей части поверхностных загрязнений без затрагивания морфологии поверхности самого стекла. При увеличении мощности разряда параметры шероховатости начинают увеличиваться, особенно резко растет R_q , что указывает на усиление воздействия плазмы и возможное начало микроповреждений самой поверхности. Из полученных данных можно сделать вывод об эффективности очистки длительностью 60 с при мощности ВЧ-источника 300 Вт для обработки поверхности перед нанесением ультратонких пленок. Однако для более толстых пленок начальная шероховатость уже не будет иметь столь сильного влияния, и возможно использование более длительных режимов с большей мощностью.

Для определения корреляции между режимами очистки в высокоплотной ICP и наблюдаемыми изменениями в морфологии поверхности стекла было проведено исследование параметров плазмы при помощи ОЭС. На рис. 3 представлены эмиссионные спектры высокоплотной ICP аргона, зарегистрированные при различных режимах мощности ВЧ-источника: 300 Вт (черная линия) и 2000 Вт (красная линия). Спектральный анализ выявил значительное увеличение интенсивности множества атомных линий Ar при росте мощности с 300 до 2000 Вт, что свидетельствует об интенсификации процессов возбуждения и ионизации в плазме. Наиболее интенсивная линия наблюдается на длине волны $\lambda \approx 811,53$ нм и соответствует переходу $\text{Ar I } 3p^54p \rightarrow 3p^54s$. Учитывая ее высокую интенсивность и стабильное присутствие во всем исследуемом диапазоне параметров, данная линия была выбрана в качестве контрольной для последующего анализа влияния мощности ВЧ-источника и расхода газа на характеристики плазмы.

Сравнение полученных эмиссионных спектров показывает, что при увеличении мощности возрастает как общее число наблюдаемых линий, так и их интенсивность. Все доминирующие пики располагаются в диапазоне от 700 до 850 нм, что соответствует электронным переходам возбужденного атомарного аргона (Ar I).

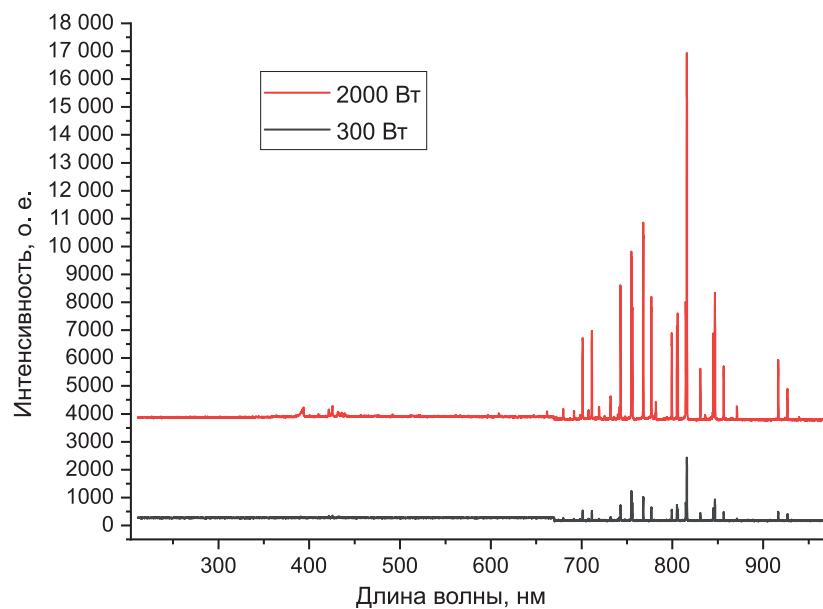


Рис. 3. Сравнение оптических эмиссионных спектров высокоплотной индуктивно-связанной плазмы аргона при мощности разряда 300 Вт и 2000 Вт

Fig. 3. Comparison of optical emission spectra of high-density inductively coupled argon plasma at a discharge power of 300 W and 2000 W

При 2000 Вт интенсивность линий увеличивается в 6–7,5 раза по сравнению с режимом 300 Вт, что свидетельствует о значительном росте плотности возбужденных частиц. Кроме того, на эмиссионном спектре большей мощности проявляются дополнительные линии в области 210–700 нм, отсутствующие или плохо различимые на эмиссионном спектре низкой мощности. Увеличение числа спектральных линий и их интенсивности указывает на повышение температуры электронов (T_e), их концентрации (n_e) и возможное увеличение степени ионизации в разряде. Это позволяет объяснить эффективное удаление поверхностных загрязнений со стеклянной подложки на начальном этапе обработки в высокоплотной ICP аргона. При увеличении мощности увеличивается и комбинированное воздействие компонентов плазмы, энергии которых превышают пороговые значения для десорбции и разрушения типичных адсорбатов [7–9]. Таким образом, на начальных этапах обработки происходит преимущественно удаление слабосвязанных молекул и примесей без повреждения подложки. Однако при превышении пороговых энергий (более 20–25 эВ) возможна деструкция поверхности – особенно в областях с дефектами или высокой концентрацией напряжений. Это объясняет рост параметров шероховатости R_a , R_q , R_z при длительности обработки более 60 с и мощности более 300 Вт, как показано на рис. 1. Полученные данные подтверждают, что изменение мощности существенно влияет на энергетические характеристики плазмы.

На рис. 4 представлены полученные зависимости интенсивности одной из основных наблюдаемых линий аргона Ar I ($\lambda = 811,53$ нм) от мощности разряда (*a*) при расходе Ar = 3,53 л/ч и расхода газа (*b*) при мощности ВЧ-источника 1000 Вт. Зависимость на рис. 4, *a* имеет монотонный, близкий к линейному характер в области до ~1000 Вт. При дальнейшем увеличении мощности (>1200 Вт) темп роста интенсивности несколько замедляется, что может быть связано с насыщением степени возбуждения или перераспределением энергии в плазме. Рост интенсивности линии с увеличением мощности разряда указывает на повышение плотности возбужденных атомов Ar, а также может служить косвенным признаком роста T_e . На рис. 4, *b* показано изменение интенсивности линии излучения аргона с длиной волны 811,53 нм в зависимости от расхода рабочего газа (Ar) при постоянной мощности ВЧ-источника 1000 Вт. При увеличении расхода газа от ~2,29 до ~4,79 л/ч наблюдается плавный рост интенсивности, что связано с увеличением числа атомов аргона в зоне разряда и, соответственно, числа возбужденных состояний. В диапазоне 4,34–4,79 л/ч интенсивность возрастает резко, почти в 1,5 раза, что может быть связано с достижением эффективного расхода газа. Локальные флуктуации, наблюдавшиеся во всем измеряемом диапазоне, могут быть вызваны неустойчивостью потока или колебаниями плотности плазмы.

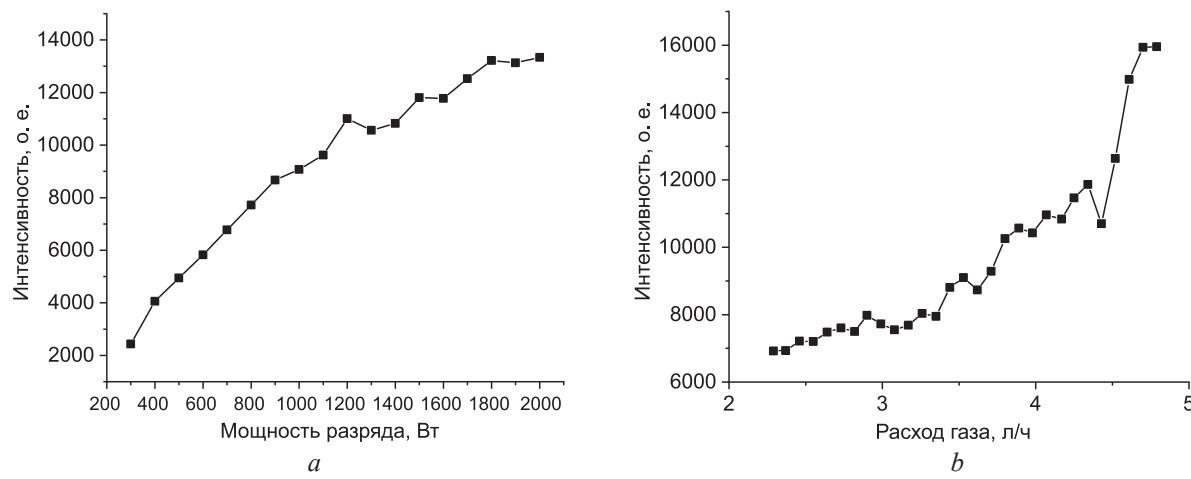


Рис. 4. Зависимость интенсивности от: *a* – мощности разряда при расходе Ar = 3,53 л/ч;
b – расхода газа при мощности высокочастотного источника 1000 Вт
Fig. 4. Dependence of intensity on: *a* – discharge power at Ar flow rate of 3.53 l/h;
b – gas flow rate at high-frequency source power of 1000 W

Полученные результаты показывают, что интенсивность линии с $\lambda = 811,53$ нм чувствительна к изменению расхода газа. Это позволяет использовать ее как в качестве индикатора стабильности режима разряда, так и для оптического контроля мощности при очистке в высокоплотной плазме аргона.

Заключение

1. Проведено комплексное исследование влияния режимов очистки в высокоплотной индуктивно-связанной плазме аргона на морфологию и шероховатость поверхности стеклянных подложек. Изучено влияние мощности разряда и расхода газа на эмиссионный спектр высокоплотной плазмы. С помощью атомно-силовой микроскопии определены оптимальные условия обработки (300 Вт, 60 с), при которых достигается минимальная шероховатость без повреждения исходной поверхности, что особенно важно для последующего нанесения ультратонких покрытий.

2. С помощью оптической эмиссионной спектроскопии установлена высокая чувствительность интенсивности спектральной линии Ar I ($\lambda = 811,53$ нм) к изменениям мощности и расхода газа. Это позволяет использовать ее в качестве индикатора стабильности и эффективности очистки.

3. Выявленные закономерности позволяют не только точно настраивать режим очистки, но и закладывают основу для внедрения систем автоматического контроля и регулирования в плазменные технологии. Практическая значимость исследования заключается в повышении воспроизводимости и качества обработки стеклянных подложек.

Список литературы

1. Лучкин, А. Г. Очистка поверхности подложек для нанесения покрытий вакуумно-плазменными методами / А. Г. Лучкин, Г. С. Лучкин // Вестник Казанского технологического университета. 2012. № 15. С. 208–210.
2. Stowers, I. F. Cleaning Optical Surfaces / I. F. Stowers, H. G. Patton // Optical Coatings: Applications and Uses II: Proceedings of the Technical Symposium “East”, 1978, Washington, DC, USA. <https://doi.org/10.1117/12.956265>.
3. Plasma Cleaning Technology: Mechanisms, Influencing Factors, and Applications / J. Sun [et al.] // IEEE Access. 2025. Vol. 13. P. 37221–37242.
4. Rauschenbach, B. Ion Beam Deposition and Cleaning / B. Rauschenbach // Springer Series in Materials Science. 2022. Vol. 324.
5. Ultra-Precision Surface Finishing by Ion Beam and Plasma Jet Techniques – Status and Outlook / T. Arnold [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2010. Vol. 616, Iss. 2–3. P. 147–156.

6. Investigation of the Argon Temperature Modes in ICP-Processing of Glass-Ceramics / I. Gafarov [et al.] // Physics of Plasmas. 2019. Vol. 26, Iss. 4. <https://doi.org/10.1063/1.5083022>.
7. Kramida, A. Atomic Spectra Database / A. Kramida, Yu. Ralchenko // NIST Standard Reference Database 78, Version 5.12. 2024.
8. Ion Energy Distributions Driven by the Ultra-Low Frequency Electrical Asymmetry Effect in Biased Inductively Coupled Plasmas / D.-S. Zhang [et al.] // Physics of Plasmas. 2025. Vol. 32, Iss. 8. <https://doi.org/10.1063/5.0258391>.
9. Desorption Lifetimes and Activation Energies Influencing Gas-Surface Interactions and Multiphase Chemical Kinetics / D. A. Knopf [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. 2024. Vol. 24, Iss. 6. P. 3445–3528. <https://doi.org/10.5194/acp-24-3445-2024>.

Поступила 19.08.2025

Принята в печать 15.09.2025

References

1. Luchkin A. G., Luchkin G. S. (2012) Cleaning the Surface of Substrates for Coating Application Using Vacuum-Plasma Methods. *Herald of Technological University*. (15), 208–210 (in Russian).
2. Stowers I. F., Patton H. G. (1978) Cleaning Optical Surfaces. *Optical Coatings: Applications and Uses II, Proceedings of the Technical Symposium "East" Washington, DC, USA*. <https://doi.org/10.1117/12.956265>.
3. Sun J., Yu Y., Tang J., Zeng Y., Chen. J. (2025) Plasma Cleaning Technology: Mechanisms, Influencing Factors, and Applications. *IEEE Access*. 13, 37221–37242.
4. Rauschenbach B. (2022) Ion Beam Deposition and Cleaning. *Springer Series in Materials Science*. 324.
5. Arnold T., Böhm G., Fechner R., Meister J., Nickel A., Frost F., et al. (2010) Ultra-Precision Surface Finishing by Ion Beam and Plasma Jet Techniques – Status and Outlook. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 616 (2–3), 147–156.
6. Gafarov I., Tovstopyat A., Galeev V., Golyaeva A., Golyaev Y., Kuznetsov E. (2019) Investigation of the Argon Temperature Modes in ICP-Processing of Glass-Ceramics. *Physics of Plasmas*. 26 (4). <https://doi.org/10.1063/1.5083022>.
7. Kramida A., Ralchenko Yu. (2024) Atomic Spectra Database. *NIST Standard Reference Database 78, Version 5.12*.
8. Zhang D.-S., Wen D.-Q., Zhao M.-L., Gao F., Zhang Y.-Y., Wang Y.-N. (2025) Ion Energy Distributions Driven by the Ultra-Low Frequency Electrical Asymmetry Effect in Biased Inductively Coupled Plasmas. *Physics of Plasmas*. 32 (8). <https://doi.org/10.1063/5.0258391>.
9. Knopf D. A., Ammann M., Berkemeier T., Pöschl U., Shiraiwa M. (2024) Desorption Lifetimes and Activation Energies Influencing Gas-Surface Interactions and Multiphase Chemical Kinetics. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 24 (6), 3445–3528. <https://doi.org/10.5194/acp-24-3445-2024>.

Received: 19 August 2025

Accepted: 15 September 2025

Сведения об авторе

Логунов К. Т., асп. каф. микро- и наноэлектроники, 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 17 293-22-63
E-mail: k.logunov@bsuir.by
Логунов Константин Тимофеевич

Information about the author

Logunov K. T., Postgraduate at Micro- and Nanoelectronics 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 17 293-22-63
E-mail: k.logunov@bsuir.by
Logunov Konstantin Timofeevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-31-38>

УДК 539.3

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СРЕДЫ, ИХ ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ СХОДИМОСТИ

Д. Е. МАРМЫШ, А. С. ДАНИЛОВА

Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Проведен анализ статистических методов, применяемых при количественной оценке показателей повреждаемости твердой деформируемой среды. К таким показателям относятся опасный объем и интегральная повреждаемость. В статье рассмотрены два алгоритма, один из которых основан на построении регулярной ортогональной сетки по потенциально повреждаемой области, второй – на применении метода Монте-Карло к вычислению кратного интеграла от функции локальной повреждаемости. Описаны алгоритмы применения каждого из подходов и проведен анализ их сходимости в зависимости от количества расчетных узлов. Функция локальной повреждаемости в каждой точке среды определялась как отношение действующих напряжений в точке к предельным напряжениям. Действующие напряжения рассчитывались методом граничных элементов. При разработке алгоритмов использовались методы параллелизации вычислений.

Ключевые слова: напряженное состояние, повреждаемость, опасный объем, статистические методы, метод Монте-Карло, сходимость, параллелизация.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мармыш, Д. Е. Статистические методы количественной оценки повреждаемости среды, их численная реализация и анализ сходимости / Д. Е. Мармыш, А. С. Данилова // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 31–38. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-31-38>.

STATISTICAL METHODS OF QUANTITATIVE ASSESSMENT OF MATERIAL DAMAGEABILITY, THEIR NUMERICAL IMPLEMENTATION AND CONVERGENCE ANALYSIS

DZIANIS E. MARMYSH, HANNA S. DANILAVA

Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. An analysis of statistical methods used to quantify damageability indicators for solid deformable media is conducted. These indicators include critical volume and integral damageability. The article discusses two algorithms, one based on constructing a regular orthogonal grid over the potentially damaged region, and the other on applying the Monte Carlo method to calculating the multiple integral of the local damageability function. Algorithms for each approach are described, and their convergence is analyzed depending on the number of computational nodes. The local damage function at each point of the material was defined as the ratio of the acting stresses at the point to the ultimate stresses. The effective stresses were calculated using the boundary element method. Parallel computation methods were used in developing the algorithms.

Keywords: stress state, damageability, critical volume, statistical methods, Monte Carlo method, convergence, parallelization.

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

For citation. Marmysh D. E., Danilava H. S. (2025) Statistical Methods of Quantitative Assessment of Material Damageability, Their Numerical Implementation and Convergence Analysis. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 31–38. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-31-38> (in Russian).

Введение

Оценка повреждаемости твердого тела (системы тел) является одной из приоритетных в современной механике деформируемого твердого тела. Адекватный анализ повреждаемости позволяет построить прогнозные модели ресурса эксплуатируемой системы, ее износа и выхода из строя, т. е. достижения своего предельного состояния. Повреждаемость можно рассчитывать как для статистического распределения полей напряжений и деформаций от действующей нагрузки, так и в динамической постановке. Большинство современных моделей повреждаемости среды стремятся ввести обобщенную скалярную величину Ψ , которая и будет количественной характеристикой, учитывающей напряженно-деформированное состояние, свойства материала, историю нагружения и проч. [1, 2].

Одной из эффективных моделей повреждаемости является концепция твердого тела с опасным объемом [3]. В статистическом варианте модели показатель повреждаемости Ψ рассчитывается как кумулятивная по опасному объему V величина локальной повреждаемости среды в расчетной точке

$$\Psi = \int_V \frac{|\sigma|}{\sigma_{\lim}} dV, \quad (1)$$

$(\sigma \geq \sigma_{\lim})$

где $|\sigma|$ – абсолютное значение действующего напряжения в точке среды; σ_{\lim} – предельное значение напряжения для выбранной теории прочности.

Опасный объем в данном случае определяется по формуле

$$V = \int_V dV.$$

$(\sigma \geq \sigma_{\lim})$

Модель (1) может быть обобщена на динамический случай, когда характеристики системы зависят от времени t . Тогда, соответственно, для вычисления показателя Ψ необходимо еще взять интеграл по времени [4]

$$\Psi = \int_0^t \left(\int_V \frac{|\sigma|}{\sigma_{\lim}} dV \right) d\tau.$$

Приняв, что действующие напряжения в точке $\sigma = f(\mathbf{r})$ можно выразить в виде функциональной зависимости от радиус-вектора \mathbf{r} , опасный объем V будет объемом фигуры, ограниченной поверхностью Ω , где Ω определяется уравнением

$$f_{\lim}(\mathbf{r}) = \sigma_{\lim}. \quad (2)$$

Форма поверхности (2), как правило, достаточно сложная и зачастую многосвязная, рассчитать объем которой аналитически не представляется возможным [5]. Для численной оценки как опасного объема V , так и повреждаемости Ψ можно пользоваться различными статистическими подходами. В статье рассмотрены два подхода, основанные на:

- 1) построении регулярной сетки по оцениваемой повреждаемой области;
- 2) методе Монте-Карло для вероятностной оценки количественных показателей повреждаемости.

Также рассматриваются возможности параллелизации численных процедур с целью снижения машинного времени, затрачиваемого на вычисления.

Расчет на регулярной сетке

Рассмотрим действие распределенных нормальных $p(x)$ и касательных $q(x)$ усилий вдоль границы полуплоскости $y \geq 0$. Расчет напряженного состояния полуплоскости можно провести численно-аналитическим методом граничных элементов, описанным в [6]. После определения полей напряжений можно предложить следующий алгоритм:

- 1) определение границ области D , в которой содержится поверхность Ω ($\Omega \subset D$);
- 2) построение по области D ортогональной расчетной сетки с шагами h_x и h_y соответственно вдоль каждой из координатных осей;
- 3) расчет компонент тензора напряжений $T_\sigma(A_k)$ в каждой точке A_k расчетной сетки, являющейся центром прямоугольника со сторонами h_x и h_y ;
- 4) определение количества точек N , в которых действующие напряжения превышают предельные.

Опасный объем V и интегральная повреждаемость Ψ рассчитываются по формулам:

$$V = N \frac{h_x h_y}{V_D};$$

$$\Psi = \sum_{k=1}^N \frac{\sigma(A_k)}{\sigma_{\lim}} h_x h_y, \quad (3)$$

где V_D – объем (площадь) области D .

Чем точнее необходимо получить величины повреждаемости, тем более детальную гранично-элементную и расчетную сетку по области D следует строить.

Для оценки работы вышеописанного алгоритма по определению повреждаемости на регулярной сетке было взято распределение нормальных усилий $p(x) = p_0 \sqrt{1 - x^2/a^2}$. Касательные усилия определялись по закону Кулона $q(x) = fp_0 \sqrt{1 - x^2/a^2}$ с коэффициентом трения $f = 0,5$.

На рис. 1 и 2 представлены соответственно графики сходимости вычислительных процессов по оценке опасного объема V и интегральной повреждаемости Ψ по эквивалентным напряжениям

$$\sigma_{eqv} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

В качестве предельного значения, ограничивающего опасную область по эквивалентным напряжениям, взято $\sigma_{\lim}^{eqv} = 0,27 p_0$. На рис. 1, 2 значения опасного объема и повреждаемости отнесены к величине действующей полной нагрузки

$$P = \int_{-a}^a [p(x) + q(x)] dx = \frac{3\pi p_0 a}{2}.$$

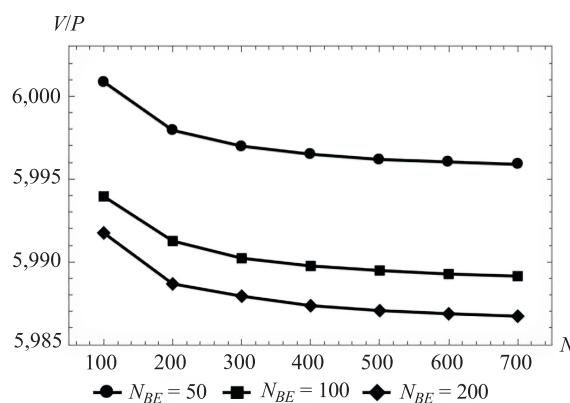


Рис. 1. Зависимость опасного объема от количества расчетных узлов

Fig. 1. Dependence of the dangerous volume on the number of calculation nodes

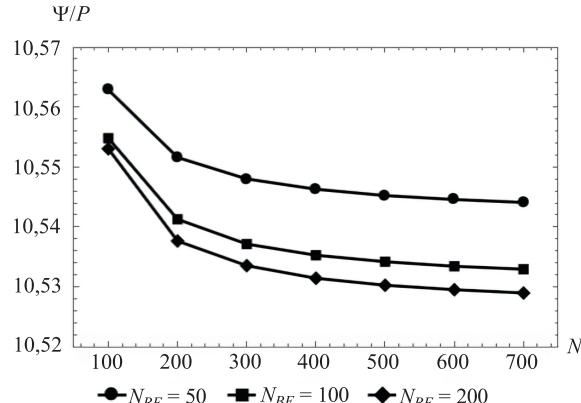


Рис. 2. Зависимость интегральной повреждаемости от количества расчетных узлов

Fig. 2. Dependence of integral damage on the number of calculation nodes

С целью изучения вопроса сеточной сходимости расчет компонент тензора напряжений проводился методом граничных элементов с разбиением отрезка распределения нагрузки на $N_{BE} = 50$, $N_{BE} = 100$ и $N_{BE} = 200$ элементов. Из рис. 1, 2 видно, что с увеличением количества расчетных узлов N вдоль каждой из осей, т. е. при уменьшении шагов сетки h_x и h_y , показатели опасного объема и интегральной повреждаемости стремятся к своим стационарным значениям. В расчетах приняты равные значения шагов сетки по обеим осям, т. е. $h_x = h_y$.

Следует отметить, что для всех трех случаев разбиения на граничные элементы значения как опасного объема, так и интегральной повреждаемости при количестве расчетных узлов 200 и 700 отличаются между собой на 4,5 %. Таким образом, при количественной оценке повреждаемости на регулярной сетке не имеет смысла построение большого количества расчетных узлов.

Согласно вышеописанному алгоритму, как расчет напряжений, так и анализ показателей повреждаемости по формулам (3) проводится независимо в каждой точке среды. В этом состоит преимущество метода граничных элементов и формул (3), которое позволяет применять параллелизацию вычислительных процедур, например, с использованием технологии CUDA [7–9]. При проведении исследований также применялись способы параллелизации вычислительных потоков. Зависимости коэффициентов ускорения вычислительных процедур при количественной оценке повреждаемости среды по эквивалентным напряжениям и максимальным главным напряжениям приведены на рис. 3. Коэффициент ускорения вычислительных процессов рассчитывался по формуле

$$k = \frac{t_{nonp}}{t_p}, \quad (4)$$

где t_{nonp} , t_p – машинное время, затрачиваемое на совершение вычислительных процедур при одних и тех же входных параметрах с использованием последовательного счета и параллелизации соответственно.

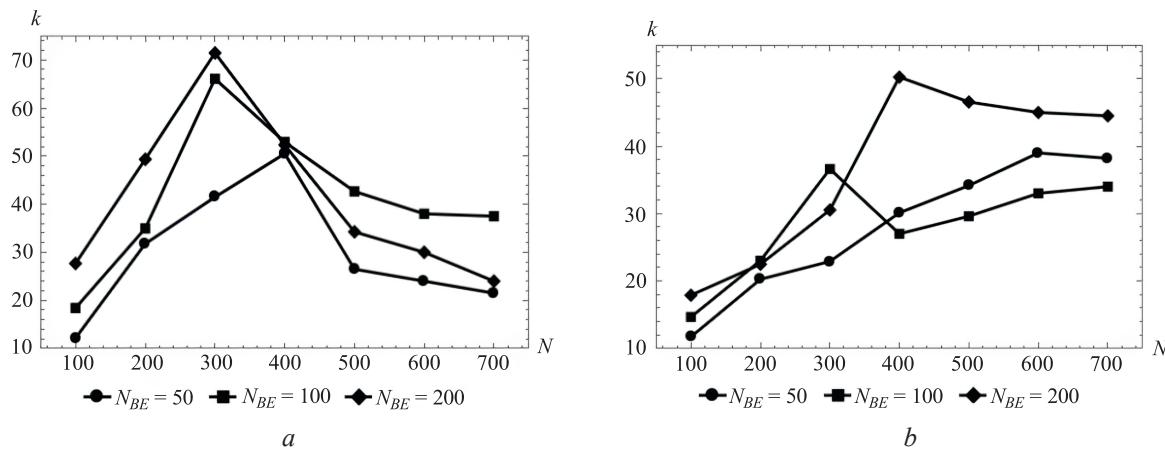


Рис. 3. Зависимость коэффициента ускорения оценки повреждаемости:
a – по эквивалентным напряжениям; b – по максимальным главным напряжениям

Fig. 3. Damage assessment acceleration factor dependence:
a – by equivalent stresses; b – by maximum principal stresses

Из рис. 3 видно, что параллелизация вычислительных потоков сокращает машинное время в десятки раз, позволяя эффективно использовать имеющиеся ресурсы.

Расчет методом Монте-Карло

Оценка величины опасного объема и интегральной повреждаемости (1) может быть произведена методом Монте-Карло, когда расчетные узлы генерируются случайным образом из выделенной области. Для генерации координат можно использовать заранее определенное распределение случайной величины (например, равномерное, нормальное, распределение Пуассона и т. д.). В исследовании использовалось равномерное распределение случайной величины по двумерной области D , в которой содержалась поверхность Ω , ограничивающая опасный объем V .

Теоретические основы метода Монте-Карло и их применение при решении различных прикладных задач описаны в [10]. Применительно к интегрированию функции метод Монте-Карло приводит к численной оценке интеграла

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f(\mathbf{x}^{(n)}) = \int_{H^r} f(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \underbrace{\int_0^1 \dots \int_0^1}_{r} f(u_1, \dots, u_r) \prod_{j=1}^r du_j, \quad (5)$$

где $f(\mathbf{x}) = f(u_1, u_2, \dots, u_r)$ – функция, заданная на единичном гиперкубе $H^r = [0,1]^r$.

Общий алгоритм количественной оценки величин опасного объема и интегральной повреждаемости твердой деформируемой среды описан в [11]. Как и для расчета на регулярной сетке, рассмотрим эллиптическое распределение нормальных $p(x) = p_0 \sqrt{1-x^2/a^2}$ и касательных усилий $q(x) = fp_0 \sqrt{1-x^2/a^2}$ вдоль границы твердой деформируемой полуплоскости.

На рис. 4 представлены зависимости сходимости численных процедур при расчете опасного объема и интегральной повреждаемости методом Монте-Карло в зависимости от количества расчетных узлов N . Для каждого значения случайным образом генерировалось 10 выборок из N координат, по которым рассчитывались напряжения и, соответственно, показатели повреждаемости. Итоговые значения опасного объема и интегральной повреждаемости усреднялись по 10 величинам. Как видно из рис. 4, при увеличении количества расчетных узлов показатели стремятся к своим стационарным значениям и уже при $N = 30 \cdot 10^4$ дают удовлетворительные результаты. Сравнивая результаты рис. 1, 2, 4, можно отметить, что метод расчета на регулярной сетке и расчет методом Монте-Карло приводят к одинаковым показателям опасного объема и интегральной повреждаемости.

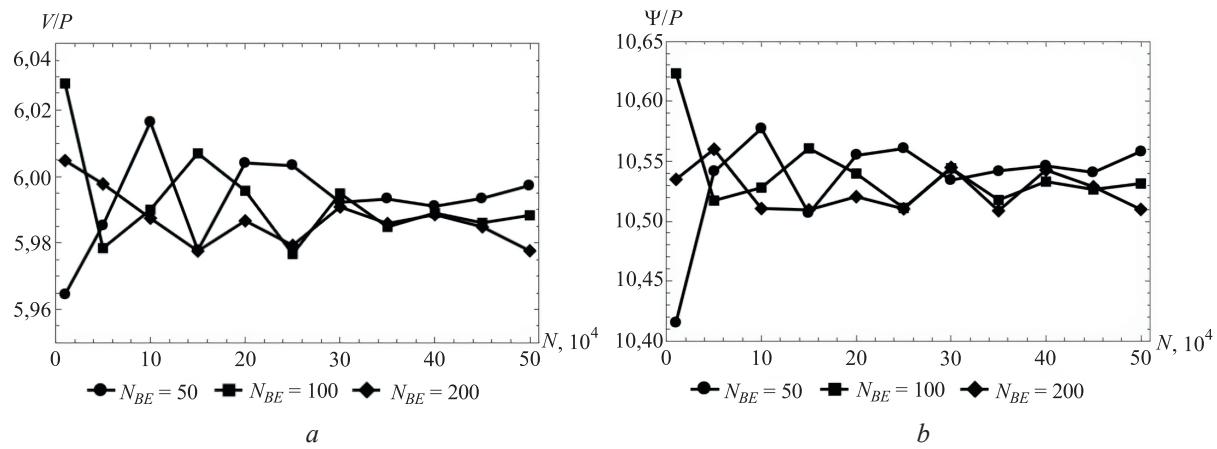


Рис. 4. Сходимость метода Монте-Карло при расчете: *a* – опасного объема; *b* – интегральной повреждаемости

Fig. 4. Convergence of the Monte Carlo method in calculating: *a* – dangerous volume; *b* – integral damage

Преимуществом метода Монте-Карло является его относительная простота в алгоритмизации и оценке результатов. Численная оценка интеграла по формуле (5) имеет медленную сходимость, порядок которой составляет $1/\sqrt{N}$, в то время как расчет на регулярной сетке имеет порядок сходимости $1/N^{r+\varepsilon}$ (где N – количество расчетных узлов; r – размерность задачи (в рассматриваемом случае $r = 2$); ε – малое число, большее 0). Как и в расчете на регулярной сетке, оценка напряженного состояния среды методом Монте-Карло происходит в каждой точке независимо. Поэтому здесь также может быть применена параллелизация вычислений с помощью технологии CUDA, либо любые другие средства, доступные исследователю. На рис. 5 показана зависимость коэффициента ускорения от количества расчетных узлов при использовании параллелизации вычислительных потоков. Из рисунка видно, что количество производительных вычислительных процедур возрастает с увеличением числа граничных элементов, используемых при оценке напряженного состояния. Также наблюдается тренд сокращения машинного времени при параллелизации с увеличением количества расчетных узлов. Причем при использовании 200 граничных элементов коэффициент ускорения достигает значения 60 и более для количества расчетных узлов $N = 30 \cdot 10^4$.

Набор координат по оценке напряженного состояния и повреждаемости среды генерировался 10 раз случайным образом из равномерного распределения по двумерной области, в которой содержался опасный объем. При генерации случайной величины важно понимать устойчивость работы численных алгоритмов по оценке параметров и, соответственно, по качеству оценки показателей. На рис. 6 показана диаграмма размаха при вычислении опасного объема среды для случая разбиения отрезка распределения нагрузки на 200 граничных элементов.

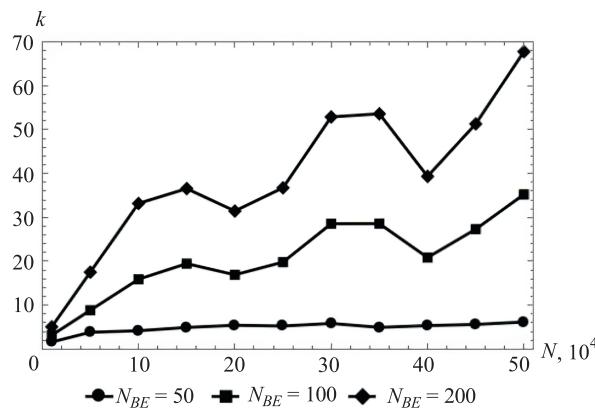


Рис. 5. Зависимость коэффициент ускорения от количества расчетных узлов при параллелизации метода Монте-Карло

Fig. 5. Dependence of the acceleration coefficient on the number of computational nodes during parallelization of the Monte Carlo method

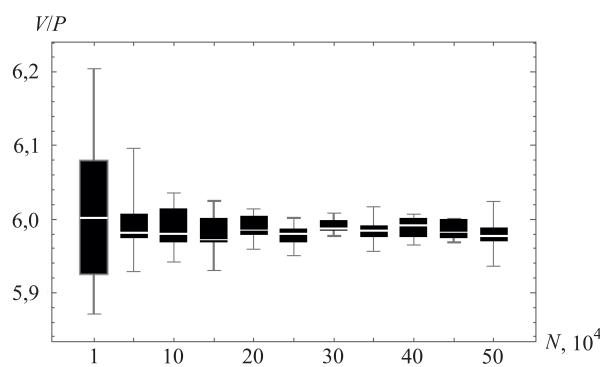


Рис. 6. Диаграмма размаха при вычислении опасного объема

Fig. 6. Boxplot diagram for calculating dangerous volume

Из рис. 6 видно, что с увеличением количества расчетных узлов для метода Монте-Карло разброс в оценке точности опасного объема снижается. Для точности оценки опасного объема при количестве расчетных узлов 10^4 разность между первым и третьим квартилями составляет 2,54 %, для размера выборки $30 \cdot 10^4$ – 0,26 %. Малый разброс показателей повреждаемости позволяет сделать вывод об устойчивости численного алгоритма, основанного на методе Монте-Карло.

Заключение

1. Представлены два алгоритмических подхода к численной оценке повреждаемости в комбинации с методом граничных элементов по расчету напряженного состояния упругой деформируемой среды. Анализ работы алгоритмов позволяет сделать утверждение об их сходимости и устойчивости, основанных на случайной генерации расчетных узлов.

2. С учетом того, что оба алгоритмических подхода используют расчет показателей повреждаемости независимо в каждой точке среды, были применены способы параллелизации вычислительных потоков. Параллелизация позволила сократить машинное время в десятки раз, тем самым повысив производительность и эффективность алгоритмов.

Список литературы

1. Hectors, K. Cumulative Damage and Life Prediction Models for High-Cycle Fatigue of Metals: A Review / K. Hectors., W. De Waele // Metals. 2021. Vol. 11, No 2. P. 1–32. <https://doi.org/10.3390/met11020204>.
2. Fatemi, A. Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories: A Survey of the State of the Art for Homogeneous Materials / A. Fatemi, L. Yang // International Journal of Fatigue. 1998. Vol. 20, Iss. 1. P. 9–34.

3. Sosnovskiy, L. A. *Tribo-Fatigue: Wear-Fatigue Damage and Its Prediction* / L. A. Sosnovskiy // Springer. 2005.
4. Щербаков, С. С. Новая модель износа / С. С. Щербаков, Л. А. Сосновский // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2016. № 1. С. 74–82.
5. Щербаков, С. С. Механика трибофатических систем / С. С. Щербаков, Л. А. Сосновский. Минск: Белор. гос. ун-т, 2011.
6. Мармыш, Д. Е. Численно-аналитический метод граничных элементов в плоской контактной задаче теории упругости / Д. Е. Мармыш // Молодежь в науке – 2012: приложение к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі». 2013. Т. 3. С. 42–46.
7. Storti, D. *CUDA for Engineers. An Introduction to High-Performance Parallel Computing* / D. Storti, M. Yurtoglu. NY: Addison-Wesley, 2016.
8. Щербаков, С. С. Ускорение гранично-элементных расчетов с помощью графического акселератора для элементов с нелинейными функциями формы / С. С. Щербаков, М. М. Полещук // Механика машин, механизмов и материалов. 2019. № 4. С. 89–94.
9. Щербаков, С. С. Распараллеливание вычислений на графическом процессоре для ускорения гранично-элементных расчетов в механике / С. С. Щербаков, М. М. Полещук, Д. Е. Мармыш // Механика машин, механизмов и материалов. 2024. № 1. С. 80–85.
10. Rubinstein, R. Y. *Simulation and the Monte Carlo Method* / R. Y. Rubinstein, D. P. Kroese; 3rd ed. USA: Wiley, 2016.
11. Мармыш, Д. Е. Метод Монте-Карло для определения и анализа повреждаемости силовой системы / Д. Е. Мармыш, В. И. Бобоед // Доклады БГУИР. 2021. Т. 19, № 1. С. 21–29. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-21-29>.

Поступила 14.07.2025

Принята в печать 09.09.2025

References

1. Hectors K., De Waele W. (2021) Cumulative Damage and Life Prediction Models for High-Cycle Fatigue of Metals: A Review. *Metals*. 11 (2), 1–32. <https://doi.org/10.3390/met11020204>.
2. Fatemi A., Yang L. (1998) Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories: A Survey of the State of the Art for Homogeneous Materials. *International Journal of Fatigue*. 20 (1), 9–34.
3. Sosnovskiy L. A. (2005) *Tribo-Fatigue: Wear-Fatigue Damage and Its Prediction*. Springer.
4. Shcherbakov S. S., Sosnovskiy L. A. (2016) A New Wear Model. *Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*. (1), 74–82 (in Russian).
5. Shcherbakov S. S., Sosnovskiy L. A. (2011) *Mechanics of Tribo-Fatigue Systems*. Minsk, Belarusian State University (in Russian).
6. Marmysh D. E. (2013) Numerical-Analytical Boundary Element Method in a Plane Contact Problem of Elasticity Theory. *Youth in Science – 2012: Supplement to the Journal “News of the National Academy of Sciences of Belarus”*. 3, 42–46 (in Russian).
7. Storti D., Yurtoglu M. (2016) *CUDA for Engineers. An Introduction to High-Performance Parallel Computing*. NY, Addison-Wesley.
8. Shcherbakov S. S., Poleshchuk M. M. (2019) Acceleration of Boundary Element Calculations Using a Graphics Accelerator for Elements with Nonlinear Shape Functions. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. (4), 89–94 (in Russian).
9. Shcherbakov S. S., Poleshchuk M. M., Marmysh D. E. (2024) Parallel Computing on a GPU to Accelerate Boundary Element Calculations in Mechanics. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. (1), 80–85 (in Russian).
10. Rubinstein R. Y., Kroese D. P. (2016) *Simulation and the Monte Carlo Method*. USA, Wiley.
11. Marmysh D. E., Babaed U. I. (2021) Monte Carlo Method for Determining and Analysis Damage to the Power System. *Doklady BGUIR*. 19 (1), 21–29. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-21-29> (in Russian).

Received: 14 July 2025

Accepted: 9 September 2025

Вклад авторов

Мармыш Д. Е. сформулировал задачу вычисления повреждаемости среды, разработал метод дискретизации распределенной нагрузки и применил его для вычисления напряженного состояния среды, разработал теоретические основы алгоритмов вычисления показателей повреждаемости, провел общий анализ полученных результатов.

Данилова А. С. разработала численные процедуры оценки показателей повреждаемости, основанные на построении регулярной сетки и на методе Монте-Карло, провела серии вычислений, разработала алгоритмы с использованием параллелизации вычислительных потоков.

Authors' contribution

Marmysh D. E. formulated the problem of calculating the damageability to the environment, developed a method for discretizing the distributed load and applied it to calculate the stress state of the environment, developed the theoretical foundations of algorithms for calculating damageability indicators, and make a general analysis of the results obtained.

Danilava H. S. developed numerical procedures for assessing damageability indicators based on the construction of a regular grid and the Monte Carlo method, performed a series of calculations, and developed algorithms using the parallelization of computational flows.

Сведения об авторах

Мармыш Д. Е., канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. теоретической и прикладной механики, Белорусский государственный университет; зам. дир. Совместного института Даляньского политехнического университета и Белорусского государственного университета

Данилова А. С., студ., Белорусский государственный университет

Адрес для корреспонденции

220030, Республика Беларусь,
Минск, просп. Независимости, 4
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 29 878-69-16
E-mail: marmyshdenis@mail.ru
Мармыш Денис Евгеньевич

Information about the authors

Marmysh D. E., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Associate Professor at Theoretical and Applied Mechanics Department, Belarusian State University; Deputy Director of the Dalian University of Technology and the Belarusian State University Joint Institute

Danilava H. S., Student, Belarusian State University

Address for correspondence

220030, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosty Ave., 4
Belarusian State University
Tel.: +375 29 878-69-16
E-mail: marmyshdenis@mail.ru
Marmysh Dzianis Evgenevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-39-47>

УДК 537.525

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОЧАСТОТНОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОМБИНИРОВАННОГО РАЗРЯДА

М. С. ЛУШАКОВА, С. И. МАДВЕЙКО, О. И. ТИХОН

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

Аннотация. Представлены результаты исследований влияния электромагнитной энергии сверхвысокочастотного диапазона на низкочастотную составляющую плазмы комбинированного (сверхвысокочастотного и низкочастотного) разряда. Экспериментально изучены выходные электрические параметры низкочастотного генератора и оптические характеристики плазмы комбинированного разряда среднего вакуума. Определено, что в процессе генерации разряда, сформированного при одновременном воздействии в едином разрядном объеме сверхвысокочастотных и низкочастотных полей при давлении 20–100 Па возможно проявление эффекта контрагирования низкочастотной составляющей комбинированного разряда. Данный эффект заключается в изменении под действием магнитного поля условий переноса тока в плазменном слое между электродами, что приводит к уменьшению амплитуды выходного напряжения низкочастотного генератора. Установлена зависимость изменения амплитуды напряжения низкочастотного генератора от выходной мощности источника питания сверхвысокочастотного генератора.

Ключевые слова: низкочастотный генератор, электромагнитная энергия, комбинированный разряд, плазма, интегральное свечение, контрагирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лушакова, М. С. Исследование электрических параметров низкочастотного генератора при формировании комбинированного разряда / М. С. Лушакова, С. И. Мадвейко, О. И. Тихон // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 39–47. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-39-47>.

STUDY OF ELECTRICAL PARAMETERS OF A LOW-FREQUENCY GENERATOR DURING THE FORMATION OF A COMBINED DISCHARGE

MARIA S. LUSHAKOVA, SIARHEI I. MADVEIKA, OLEG I. TSIKHAN

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

Abstract. The article presents the results of a study examining the influence of microwave electromagnetic energy on the low-frequency component of a combined (microwave and low-frequency) discharge plasma. The output electrical parameters of a low-frequency generator and the optical characteristics of a combined medium-vacuum discharge plasma were experimentally studied. It was determined that, during the generation of a discharge formed by the simultaneous action of microwave and low-frequency fields in a single discharge volume at a pressure of 20–100 Pa, a constriction effect of the low-frequency component of the combined discharge may occur. This effect consists of a change in the current transfer conditions in the plasma layer between the electrodes under the influence of a magnetic field, which leads to a decrease in the amplitude of the low-frequency generator output voltage. The dependence of the change in the voltage amplitude of the low-frequency generator on the output power of the microwave generator power source was established.

Keywords: low-frequency generator, electromagnetic energy, combined discharge, plasma, integral glow, contraction.

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

For citation. Lushakova M. S., Madveika S. I., Tsikhan O. I. (2025) Study of Electrical Parameters of a Low-Frequency Generator During the Formation of a Combined Discharge. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 39–47. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-39-47> (in Russian).

Введение

В современной технологии полупроводниковой техники все чаще используются установки, включающие в себя воздействие на обрабатываемые объекты комбинаций различных разрядов, таких как сверхвысокочастотные (СВЧ), низкочастотные (НЧ) и высокочастотные (ВЧ) [1]. Даные решения более сложные для реализации. Однако они позволяют использовать дополнительное управление параметрами плазменного разряда. Сложности реализации таких технологических систем связаны с наложением различных частот в едином объеме плазменной камеры и с их влиянием друг на друга. Характер взаимодействия в едином плазменном объеме полей разных частот одновременно при создании комбинированного разряда требует дополнительного изучения работы формирующих разряд генераторов и конфигурации камеры, которые могут оказывать влияние на работу каждого генератора в отдельности.

Одной из систем для процессов модификации поверхности и удаления материалов микрэлектроники является устройство на базе комбинации СВЧ- и НЧ-полей в едином плазменном объеме. Устройство позволяет эффективно выполнять направленное воздействие на обрабатываемый материал, управлять энергетическим потоком активных частиц, вследствие чего существует возможность улучшения параметров технологических процессов обработки материалов относительно воздействия самостоятельных СВЧ- и НЧ-разрядов.

Источники низких частот формируют «медленное» переменное поле с возможностью импульсного модулирования. При таких частотах можно эффективно управлять плотностью и энергией частиц в плазме за счет изменения амплитуды и формы сигнала [2, 3]. Источники сверхвысоких частот характеризуются эффективной ионизацией, создавая плотный, высокоэнергетический ионно-электронный газ. Таким образом, поддерживается устойчивая плазма с высокой плотностью электронов [4, 5].

В рамках комбинированного разряда НЧ-разрядная система формирует столб тлеющего разряда. НЧ-разряд ускоряет протекание плазменных процессов в камере, позволяет эффективно управлять энергетическими характеристиками плазмы вблизи поверхности обрабатываемого материала, повышает равномерность распределения плазмы в разрядной камере, улучшает качественные характеристики процесса обработки ввиду использования дополнительного способа управления активными частицами. Основным энергетическим источником активных частиц является вклад плазмы СВЧ-разряда в комбинированный разряд.

В связи с тем, что комбинированный разряд сформирован совместным воздействием в едином плазменном объеме СВЧ- и НЧ-полей, необходимо отметить, что на структуру и свойства тлеющего разряда оказывает значительное влияние сверхвысокочастотная электромагнитная энергия. Конструктивно разрядная система сформирована так, что электромагнитная энергия поступает в камеру в поперечном направлении относительно НЧ-разрядной системы. В замкнутом кольцевом прямоугольном волноводе возникают переменное магнитное и электрическое поля, циркулирующие по кольцу, ввиду чего магнитное поле может оказывать влияние на поведение и стабильность плазмы комбинированного разряда.

В публикациях обычно рассматривается процесс контрагирования при воздействии на тлеющий разряд магнитного поля, который представляется сжатием разрядного тока в цилиндрических разрядных системах ввиду вытеснения нагревающегося газа из приосевой области к периферии разрядной камеры [6]. Также известны исследования относительно влияния продольного магнитного поля на катодные части тлеющего разряда в различных газах [7, 8], где показано, что магнитное поле уменьшает напряжение тлеющего разряда, при этом полная светимость разряда и интенсивность отдельных спектральных линий увеличиваются в 10–12 раз. Однако питание тлеющего разряда в [7, 8] осуществлялось источником постоянного тока. Также в [7] был получен результат при исследовании спектра Не в разряде на переменном токе 50 Гц для единичных экспериментов. Необходимо отметить, что данные результаты относятся к экспериментальным научно-исследовательским разработкам разрядных камер с малым плазменным объемом,

конструкция которых не предполагает использования в технологическом цикле производства полупроводниковых приборов.

Следует отметить, что в опубликованных к настоящему времени научно-технических материалах отсутствует глубоко разработанная и экспериментально подтвержденная универсальная теория взаимодействия СВЧ- и НЧ-полей при формировании комбинированного газового разряда в системах технологического назначения. Это приводит к тому, что разрозненный, часто противоречивый эмпирический материал, содержащийся в литературе, не позволяет однозначно прогнозировать характеристики вновь разрабатываемых плазмотронов.

В данной статье представлено исследование влияния электромагнитной энергии СВЧ-разряда на низкочастотный тлеющий разряд при формировании комбинированного разряда с выявлением аномалии поведения электрических параметров НЧ-генератора.

Методика проведения эксперимента

Создание исследуемого комбинированного разряда осуществлялось одновременным введением в разрядный объем СВЧ- и НЧ-полей. Для создания НЧ- поля использовался маломощный НЧ-генератор частотой 33 кГц, который может функционировать в прерывистом (пачками импульсов по 50 Гц) и непрерывном режимах работы. Источником СВЧ-энергии являлся магнетрон М-112, условия работы которого определялись режимом работы его источника питания. В разрядный объем вводилась СВЧ-энергия через щелевые отверстия кольцевого резонатора волноводного типа пачками однополярных импульсов с частотой 50 Гц.

Эксперименты проводились в среде кислорода и тетрафторида углерода (CF_4) ввиду того, что данные газы чаще всего используются в технологии производства полупроводниковых приборов. В частности, в среде кислорода выполняются операции удаления фоторезиста с поверхности полупроводниковых пластин и очистка материалов, а в среде CF_4 – направленное травление кремния для формирования структуры и рельефа поверхности.

Для оценки электрических параметров НЧ-составляющей комбинированного разряда сигнал с потенциального электрода подавался на один из каналов двухканального осциллографа. В синхронном режиме на второй канал выводились данные с фотоэлектронного умножителя ФЭУ-112 для оценки огибающей интегрального оптического свечения плазмы комбинированного разряда, либо данные с шунта – для оценки тока НЧ-генератора. Регистрация спектров НЧ-, СВЧ- и комбинированного разрядов проводилась с помощью спектрометра SL 40-2-2048 ISA. Полученные данные обрабатывались для формирования общих спектральных характеристик.

Результаты исследований и их обсуждение

С использованием осциллографа была проведена синхронная регистрация интегрального оптического свечения комбинированного разряда, зафиксированного ФЭУ, и выходного напряжения НЧ-генератора при различных значениях выходной мощности источника питания СВЧ-генератора (от 450 до 1540 Вт) (рис. 1). Исходная выходная мощность НЧ-генератора устанавливалась на максимальном уровне – 270 Вт. Результаты фиксировались в среде кислорода при давлении $p = 70$ Па.

На рис. 1 временной интервал работы СВЧ-генератора одновременно с НЧ-генератором при формировании комбинированного разряда обозначен как τ_1 , область действия только НЧ-генератора – как τ_2 . Экспериментально установлено, что при увеличении выходной мощности источника питания СВЧ-генератора происходит самопроизвольное снижение амплитуды выходного напряжения НЧ-генератора, что является нетипичным режимом работы. В течение периода τ_2 амплитуда сигнала выходного напряжения НЧ-генератора остается неизменной. Данный эффект может быть связан с изменениями условий генерации плазмы при формировании комбинированного разряда, отличающимися от обособленного НЧ-разряда. Предполагается, что при увеличении выходной мощности источника питания СВЧ-генератора увеличивается воздействие магнитной составляющей СВЧ- поля на НЧ-разряд, в процессе чего может проявляться эффект контрагирования низкочастотной составляющей комбинированного разряда, которому соответствует данное уменьшение амплитуды напряжения. Это требует особого внимания при определении мощности источников питания как СВЧ-, так и НЧ-генераторов.

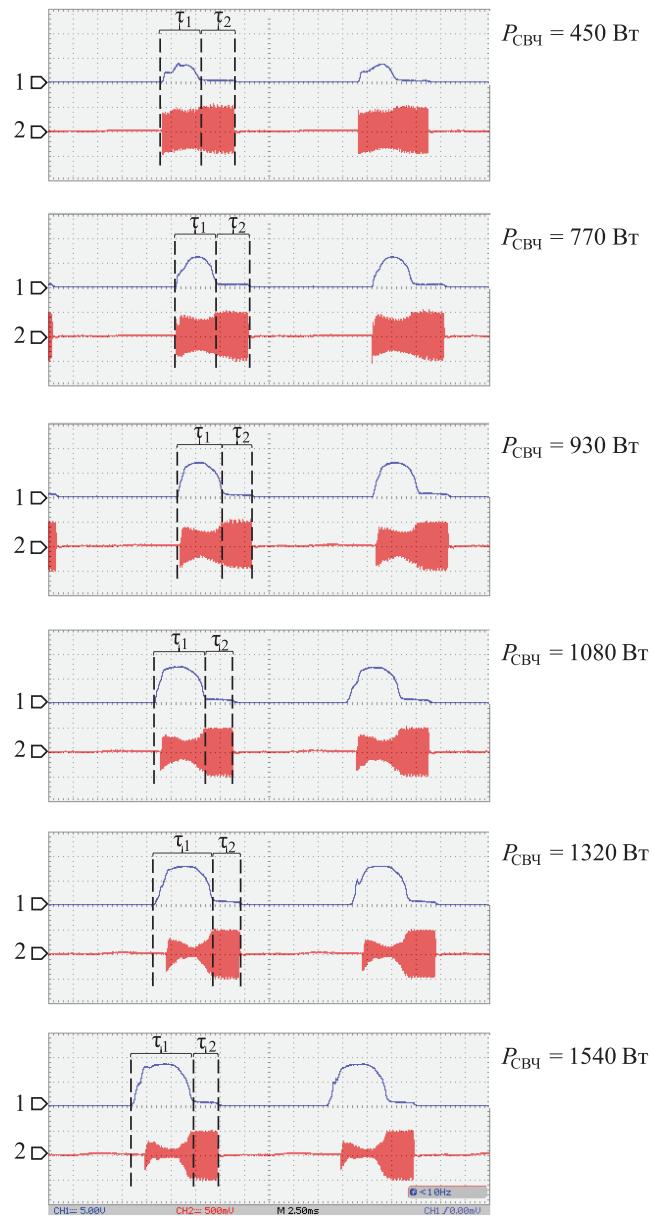


Рис. 1. Осциллограммы интегрального оптического свечения комбинированного разряда (1) и выходного напряжения (2) низкочастотного генератора при разной выходной мощности источника питания сверхвысокочастотного генератора

Fig. 1. Oscillograms of the integrated optical glow of the combined discharge (1) and the output voltage (2) of the low-frequency generator at different output powers of the power source of the ultra-high-frequency generator

На рис. 2 представлены осциллограммы выходного напряжения и тока НЧ-генератора при формировании самостоятельного низкочастотного (рис. 2, *a*, *c*) и комбинированного (рис. 2, *b*, *d*) разрядов при давлении в разрядной камере 70 и 150 Па. Выходная мощность НЧ-генератора составляла 270 Вт, выходная мощность источника питания СВЧ-генератора – 1320 Вт.

Как показано на рис. 2, *b*, при давлении 70 Па воздействие электромагнитного поля в процессе формирования комбинированного разряда приводит к изменению значений тока и напряжения низкочастотной составляющей. При включении СВЧ-магнетрона амплитуда пачки импульсов напряжения НЧ-составляющей разряда уменьшается, а амплитуда сигнала тока увеличивается с некоторой временной задержкой. С такими изменениями величина тока остается в рабочем диапазоне функционирования НЧ-генератора и не уменьшается. При давлении 150 Па данный эффект практически не наблюдается (рис. 2, *d*), в процессе формирования комбинированного

разряда амплитуда пачки импульсов напряжения НЧ-генератора существенно не изменяется и не привязана к импульсам СВЧ-генератора. Небольшое изменение амплитуды напряжения для низкочастотного и комбинированного разрядов при 150 Па может указывать на схемотехнические особенности работы НЧ-генератора, не оказывающие значительных воздействий на формирование комбинированного разряда.

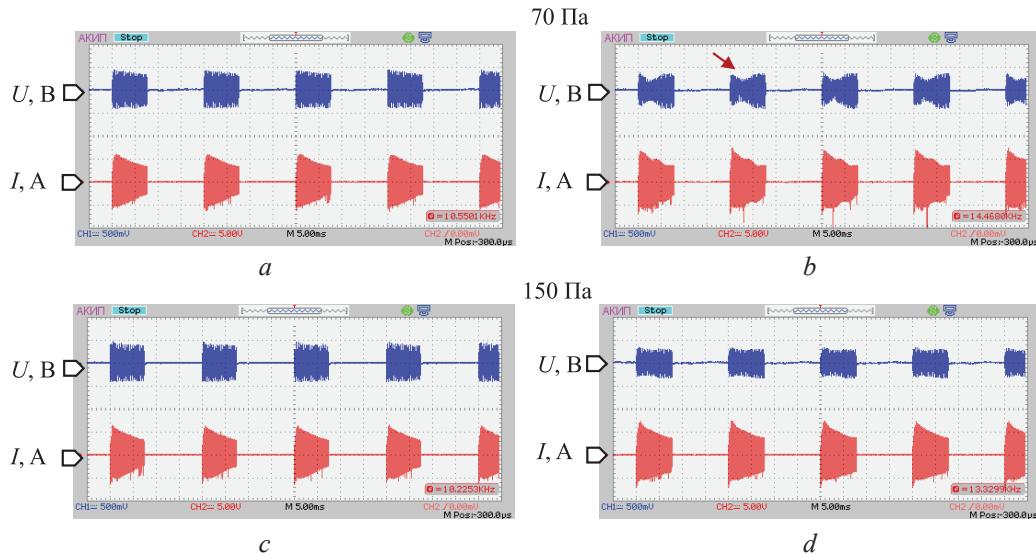


Рис. 2. Осциллограммы выходного напряжения и тока низкочастотного генератора при формировании разряда: *a, c* – самостоятельного низкочастотного; *b, d* – комбинированного

Fig. 2. Oscillograms of the output voltage and current of a low-frequency generator during discharge formation: *a, c* – independent low-frequency; *b, d* – combined

На рис. 3 представлены осциллограммы выходного напряжения НЧ-генератора и интегрального оптического свечения комбинированного разряда при давлении в разрядной камере 70 и 150 Па. Мощность НЧ-генератора составляла 270 Вт, выходная мощность источника питания СВЧ-генератора – 1320 Вт.

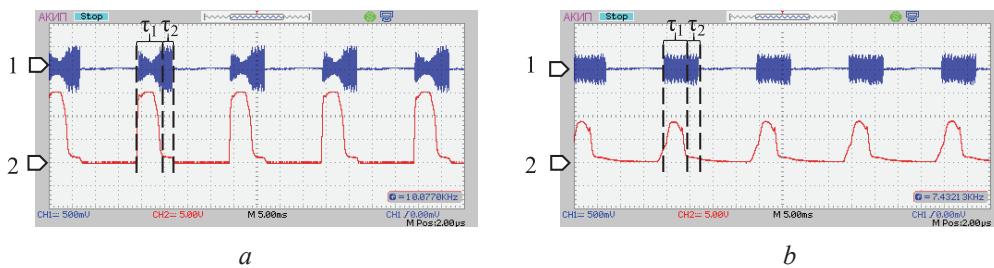


Рис. 3. Осциллограммы выходного напряжения низкочастотного генератора (1) и интегрального оптического свечения комбинированного разряда (2) при давлении, Па: *a* – 70; *b* – 150

Fig. 3. Oscillograms of the output voltage of the low-frequency generator (1) and the integrated optical glow of the combined discharge (2) at pressure, Pa: *a* – 70; *b* – 150

При анализе представленных данных установлено, что с увеличением мощности источника питания СВЧ-генератора до 1320 Вт при давлении 150 Па на участке импульса τ_1 не происходит значительного изменения амплитуды выходного напряжения НЧ-генератора (рис. 3, *b*), как на участке τ_1 при 70 Па (рис. 3, *a*). Однако амплитуда интегрального оптического свечения плазмы комбинированного разряда при давлении 70 Па значительно превышает амплитуду интегрального оптического свечения плазмы комбинированного разряда, сформированного при давлении 150 Па, ввиду изменения условий плазмообразования. Таким образом, самопроизвольное снижение мгновенного выходного напряжения НЧ-генератора при одновременной работе с СВЧ-генератором на плазменную нагрузку при давлении 20–70 Па не может являться результатом схемотехнических особенностей работы НЧ-генератора и указывает на эффект контрагирования низкочастотной оставляющей комбинированного разряда под действием магнитного поля.

По результатам измерений получена зависимость амплитуды выходного напряжения НЧ-генератора при контрагировании разряда (q), рассчитанная относительно амплитуды его выходного напряжения для типичного режима работы, от выходной мощности источника питания СВЧ-генератора ($W_{\text{СВЧ}}$) при давлении 70 и 150 Па (рис. 4).

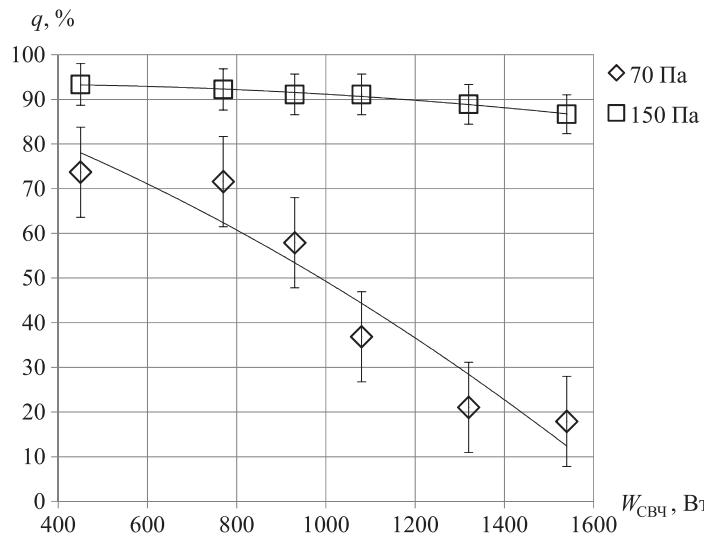


Рис. 4. Зависимость амплитуды выходного напряжения низкочастотного генератора от выходной мощности источника питания сверхвысокочастотного генератора

Fig. 4. Dependence of the output voltage amplitude of a low-frequency generator on the output power of the power source of a microwave generator

При давлении 70 Па зависимость на рис. 4 имеет ярко выраженный нисходящий характер. Увеличение мощности источника питания СВЧ-генератора и, соответственно, мощности, вкладываемой в разряд, усиливает эффект контрагирования. Полученные результаты соотносятся с данными [8, 10], в которых продольное магнитное поле, наложенное только на область отрицательного свечения тлеющего разряда низкого давления (10–70 Па), оказывает значительное влияние на разряд, а именно: светящийся диаметр разряда сжимается в 3–5 раз, общее напряжение на разряде уменьшается примерно в три раза, температура и плотность электронов повышаются на порядок величины.

При давлении 150 Па эффект контрагирования выражен минимально, изменение амплитуды незначительно. Это сопоставимо с результатами [7–10], где с увеличением давления более 150 Па длина положительного столба увеличивается. Также показано, что при давлении в разрядной камере > 150 Па магнитное поле не оказывает значительного влияния на диффузию заряженных частиц и изменение напряжения.

Для исследования интенсивности свечения плазмы комбинированного разряда и отдельных СВЧ- и НЧ-разрядов были изучены их спектральные характеристики (рис. 5, 6) для рабочего давления 70 Па, при котором проявляется эффект контрагирования. Значения на рисунках приведены для отдельных значимых линий спектра, результаты фиксировались в средах CF_4 (рис. 5) и O_2 (рис. 6). На рис. 5 λ – длина волны, которую испускают различные элементы, молекулы, атомы в плазме и формируют плазменное свечение.

Анализ результатов исследований показал, что интенсивность свечения плазмы комбинированного разряда превышает интенсивность свечения отдельных НЧ- и СВЧ-разрядов. Увеличение интенсивности свечения плазмы комбинированного разряда может быть связано с процессом контрагирования НЧ-составляющей комбинированного разряда ввиду воздействия электромагнитных полей. Также увеличение интенсивности свечения может быть следствием более высокой степени ионизации (до 7 %) и плотности плазмы (от 10^{10} до 10^{13} см^{-3}) [11] СВЧ-составляющей комбинированного разряда, по сравнению с НЧ-разрядом. Это обеспечивает сравнительно высокую концентрацию химически активных радикалов и фрагментов молекул в объеме плазмы комбинированного разряда.

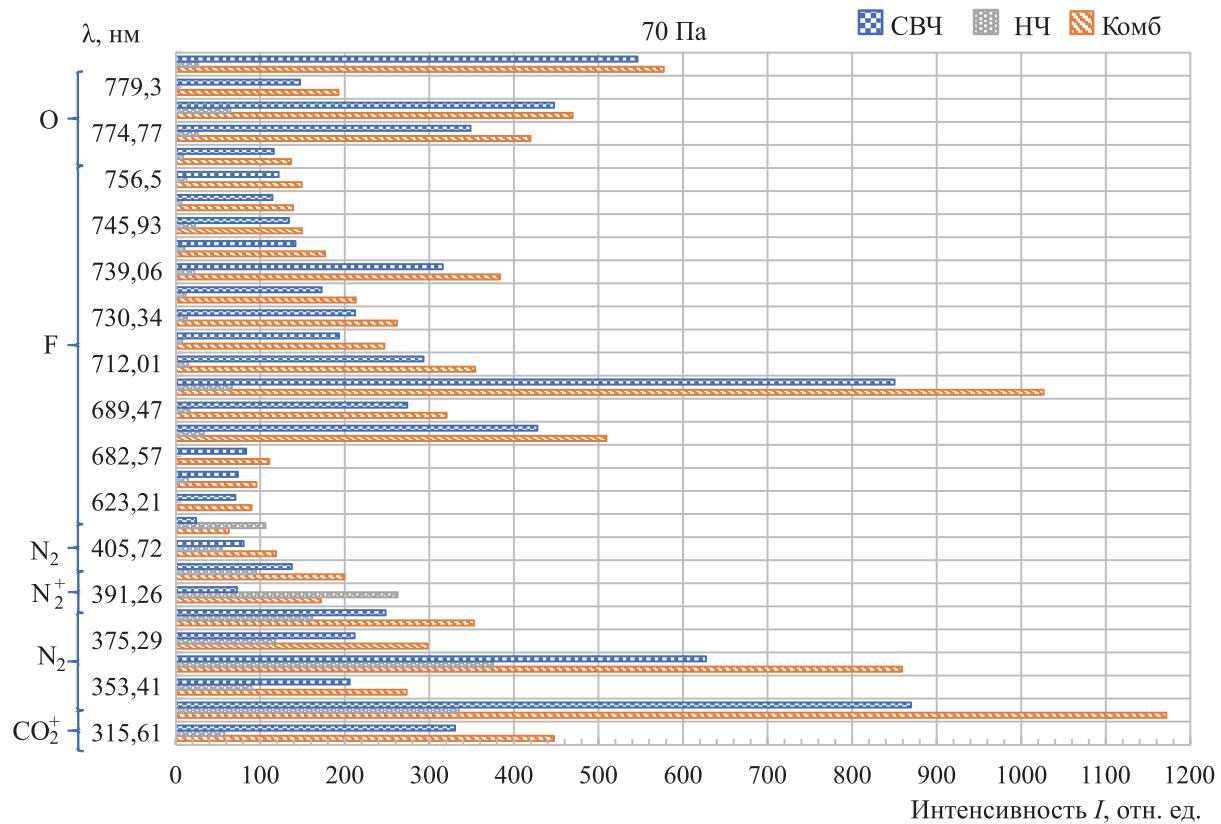


Рис. 5. Спектральные характеристики отдельных линий при давлении 70 Па в среде CF_4
Fig. 5. Spectral characteristics of individual lines at a pressure of 70 Pa in a CF_4 medium

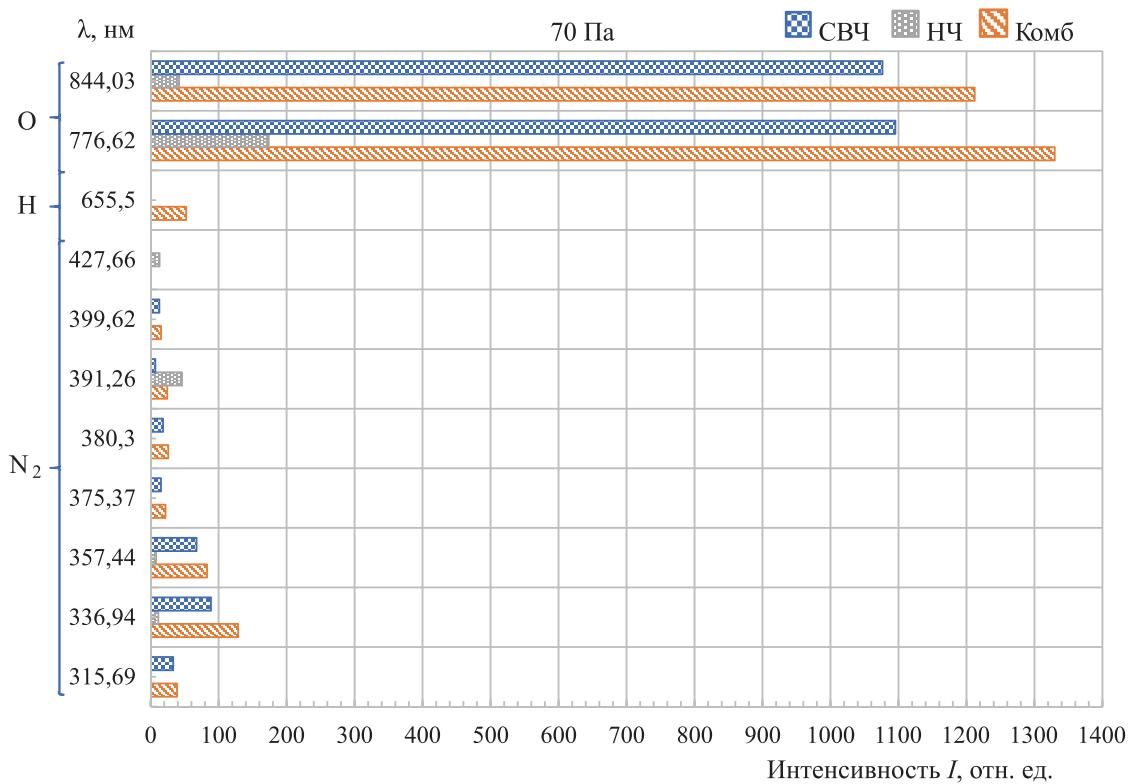


Рис. 6. Спектральные характеристики отдельных линий при давлении 70 Па в среде O_2
Fig. 6. Spectral characteristics of individual lines at a pressure of 70 Pa in an O_2 medium

Необходимо отметить, что для комбинированного разряда данной конфигурации (НЧ + СВЧ) важным параметром является мощность СВЧ-составляющей плазмы комбинированного разряда, так как при увеличении воздействия электромагнитного поля на НЧ-составляющую комбинированного разряда возможен переход контрагированного разряда к дуговому, что неприемлемо для процессов плазмохимической обработки. Результаты данных исследований следует учитывать при проектировании более мощных разрядных устройств комбинированного типа схожей конфигурации.

Заключение

Экспериментально установлено, что в процессе формирования комбинированного разряда при одновременном воздействии в едином реакционно-разрядном объеме сверхвысокочастотных и низкочастотных полей в диапазоне давлений 20–100 Па введение сверхвысокочастотной энергии через щелевые отверстия кольцевого резонатора волноводного типа перпендикулярно емкостной разрядной системе приводит к возникновению эффекта контрагирования низкочастотной составляющей комбинированного разряда, заключающегося в изменении под действием магнитного поля условий переноса тока в плазменном слое между электродами. Данный эффект приводит к уменьшению диффузии заряженных частиц на стенки камеры и увеличению неравномерности их скорости между электродами, что может быть нежелательным, поскольку снижает эффективность проведения процессов ионно-плазменной обработки поверхностей материалов электронной техники.

Список литературы

1. Lebedev, Yu. A. Microwave Discharges at Low Pressures and Peculiarities of the Processes in Strongly Non-Uniform Plasma / Yu. A. Lebedev // Plasma Sources Sci. Technol. 2015. Vol. 24, No 5. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/24/5/053001>.
2. Effect of Low-Frequency Voltage Waveform on Plasma Uniformity in a Dual-Frequency Capacitively Coupled Plasma / S. Rauf [et al.] // Journal of Vacuum Science & Technology B. 2022. Vol. 40, Iss. 3. <https://doi.org/10.1116/6.0001732>.
3. Low-Frequency Dependence of Plasma Characteristics in Dual-Frequency Capacitively Coupled Plasma sources / Yang Zhou [et al.] // Appl. Phys. Lett. 2024. Vol. 124, No 6. <https://doi.org/10.1063/5.0190803>.
4. Characteristics of 2.45 GHz Microwave Plasma by Langmuir Probe Measurements / Sun Choi [et al.] // Solid State Phenomena. 2007. Vol. 124–126. P. 1621–1624. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.124-126.1621-1624>.
5. Langmuir Probe Diagnostic Studies of Pulsed Hydrogen Plasmas in Planar Microwave Reactors / A. Rousseau [et al.] // Journal of Applied Physics. 2002. Vol. 92, No 7. P. 3463–3471. <https://doi.org/10.1063/1.1497454>.
6. Переход газового разряда в контрагированное состояние / Е. А. Муратов [и др.] // ТВТ. 1975. Т. 13, № 3. С. 654–656.
7. Уланов, И. М. Экспериментальные исследования влияния продольного магнитного поля на катодные части тлеющего разряда в гелии / И. М. Уланов, А. Ю. Литвинцев // Журнал технической физики. 2004. Т. 74, № 9. С. 32–38.
8. Влияние магнитного поля на ионизующий разряд в воздухе / А. В. Ерофеев [и др.] // Письма в журнал технической физики. 2009. Т. 35, № 3. С. 82–88.
9. Уланов, И. М. Влияние продольного магнитного поля на рекомбинационное излучение тлеющего разряда низкого давления в водороде и гелии / И. М. Уланов, А. Ю. Литвинцев, В. А. Пинаев // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 1. С. 3–12.
10. Уланов, И. М. Исследование непрерывного спектра тлеющего разряда низкого давления в водороде и гелии в продольном магнитном поле / И. М. Уланов, В. А. Пинаев // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 1. С. 30–38. <https://doi.org/10.7868/S0040364414010219>.
11. Бордусов, С. В. Плазменные СВЧ-технологии в производстве изделий электронной техники / С. В. Бордусов. Минск: Бестпринт, 2002.

Поступила 30.09.2025

Принята в печать 27.10.2025

References

1. Lebedev Yu. A. (2015) Microwave Discharges at Low Pressures and Peculiarities of the Processes in Strongly Non-Uniform Plasma. *Plasma Sources Sci. Technol.* 24 (5). <https://doi.org/10.1088/0963-0252/24/5/053001>.

2. Rauf S., Tian P., Kenney J., Dorf L. (2022) Effect of Low Frequency Voltage Waveform on Plasma Uniformity in a Dual-Frequency Capacitively Coupled Plasma. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 40 (3). <https://doi.org/10.1116/6.0001732>.
3. Yang Zhou, Kai Zhao, Fang-Fang Ma, Yong-Xin Liu, Fei Gao, Julian Schulze, et al. (2024) Low-Frequency Dependence of Plasma Characteristics in Dual-Frequency Capacitively Coupled Plasma Sources. *Appl. Phys. Lett.* 124 (6). <https://doi.org/10.1063/5.0190803>.
4. Sun Choi, Wataru Minami, Lae Kim, Hee Kim (2007) Characteristics of 2.45 GHz Microwave Plasma by Langmuir Probe Measurements. *Solid State Phenomena*. 124–126, 1621–1624. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.124-126.1621-1624>.
5. Rousseau A., Teboul E., Lang N., Hannemann M., Rupke J. (2002) Langmuir Probe Diagnostic Studies of Pulsed Hydrogen Plasmas in Planar Microwave Reactors. *Journal of Applied Physics*. 92 (7), 3463–3471. <https://doi.org/10.1063/1.1497454>.
6. Muratov E. A., Persiantsev I. G., Pismenny V. D., Rakhimov A. T. (1975) Transition of a Gas Discharge to a Contracted State. *TVT*. 13 (3), 654–656 (in Russian).
7. Ulanov I. M., Litvintsev A. Yu. (2004) Experimental Study of the Effect of a Longitudinal Magnetic Field on the Cathode Parts of a Glow Discharge in Helium. *Technical Physics*. 49 (9), 1135–1141. <https://doi.org/10.1134/1.1800233> (in Russian).
8. Erofeev A. V., Zhukov B. G., Lapushkina T. A., Ponyaev S. A., Bobashev S. V. (2009) Effect of a Magnetic Field on Ionizing Electric Discharge in Air. *Technical Physics Letters*. 35 (2), 137–140. <https://doi.org/10.1134/S1063785009020126> (in Russian).
9. Ulanov I. M., Litvintsev A. Y., Pinaev V. A. (2011) The Influence of Longitudinal Magnetic Field on Recombination Radiation of Low-Pressure Glow Discharge in Hydrogen and Helium. *High Temperature*. 49 (1), 1–11. <https://doi.org/10.1134/S0018151X11010251> (in Russian).
10. Ulanov I. M., Pinaev V. A. (2014) Study of the Continuous Spectrum of a Low Pressure Glow Discharge in Hydrogen and Helium in a Longitudinal Magnetic Field. *High Temperature*. 52 (1), 26–34. <https://doi.org/10.1134/S0018151X14010209> (in Russian).
11. Bordusov S. V. (2002) *Plasma Microwave Technologies in the Production of Electronic Devices*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).

Received: 30 September 2025

Accepted: 27 October 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

Лушакова М. С., ст. преп. каф. электронной техники и технологии, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Мадвейко С. И., канд. техн. наук, доц., зав. каф. электронной техники и технологии, БГУИР

Тихон О. И., мл. науч. сотр. Центра «Ионно-плазменные системы и технологии», БГУИР

Information about the authors

Lushakova M. S., Senior Lecturer at the Department of Technique and Technology, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Madveika S. I., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Technique and Technology, BSUIR

Tsikhan O. I., Junior Researcher at the “Plasma Processing Research Center”, BSUIR

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-80-88
E-mail: lushakova@bsuir.by
Лушакова Мария Сергеевна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-80-88
E-mail: lushakova@bsuir.by
Lushakova Maria Sergeevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-48-55>

УДК 537.612.3, 519.632

КОНСЕРВАТИВНАЯ РАЗНОСТНАЯ СХЕМА ДЛЯ ЗАДАЧ МАГНИТОСТАТИКИ СО СКАЛЯРНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ

В. В. ШЕКЕЛЕВСКИЙ

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

Аннотация. Для обеспечения повышенной точности вычислений уравнений магнитостатики на границах постоянных магнитов представлен вывод их консервативной разностной схемы со скалярным магнитным потенциалом на основе интегро-интерполяционного метода. Рассмотрены особенности дискретизации дивергенции намагниченности в областях функции, имеющей разрывы первого рода. Для проверки полученной схемы разработан алгоритм, на основе которого написана программа для расчета постоянных магнитов с использованием языка программирования Python 3.11 и библиотеки Taichi. Предлагаемая схема соблюдает законы сохранения и обеспечивает высокую точность решения, что позволяет применять полученные результаты для расчета магнитных полей в технологических разрядных устройствах для формирования функциональных слоев и покрытий в микроэлектронике и оптике, а также в технических прикладных задачах, связанных с магнитной динамикой.

Ключевые слова: расчет постоянных магнитов, метод конечных разностей, скалярный магнитный потенциал, уравнение Пуассона, консервативная разностная схема.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Автор выражает благодарность Д. А. Котову и Д. Б. Мигасу за помощь в обсуждении материала.

Для цитирования. Шекелевский, В. В. Консервативная разностная схема для задач магнитостатики со скалярным магнитным потенциалом / В. В. Шекелевский // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 48–55. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-48-55>.

A CONSERVATIVE FINITE-DIFFERENCE SCHEME FOR MAGNETOSTATICS PROBLEMS WITH A SCALAR MAGNETIC POTENTIAL

VADZIM U. SHAKIALEUSKI

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

Abstract. To enhance the accuracy of solving magnetostatic equations at permanent-magnet boundaries, we propose a conservative finite-difference scheme for the scalar magnetic potential based on the integro-interpolation method. The features of discretization of magnetization divergence in regions of a function having discontinuities of the first kind are considered. To validate the scheme, we developed an algorithm and implemented a program for computing permanent magnets using Python 3.11 and the Taichi library. The proposed scheme preserves conservation laws and ensures high computational accuracy, making the results applicable to magnetic-field calculations in technological discharge devices for the formation of functional layers and coatings in microelectronics and optics, as well as to engineering problems related to magnetic dynamics.

Keywords: calculation of permanent magnets, finite difference method, scalar magnetic potential, Poisson equation, conservative finite-difference scheme.

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

Gratitude. The author would like to thank D. A. Kotov and D. B. Migas for their assistance in discussing the necessary materials.

For citation. Shakialeuski V. U. (2025) A Conservative Finite-Difference Scheme for Magnetostatics Problems with a Scalar Magnetic Potential. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 48–55. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-48-55> (in Russian).

Введение

Сегодня в производстве изделий микро- и наноэлектроники для получения тонких пленок металлов и диэлектриков самыми распространенными являются ионно-плазменные устройства [1]. В частности, это магнетронные распылительные системы разных типов, где конфигурация линий индукции и величина магнитного поля имеют определяющее значение как для процесса распыления, так и для равномерного нанесения на подложку [2]. Тем не менее до сих пор нет единого подхода и четко определенной методики проектирования подобных технологических разрядных систем. В связи с этим актуально применение методов расчетного моделирования процессов плазмообразования, оказывающих основное влияние на процесс распыления, которые включают в себя расчет магнитных и электрических полей.

Чаще других применяют метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных объемов и метод конечных разностей (МКР), которые позволяют с достаточной степенью точности приближенно решать уравнения Максвелла для расчета электрических и магнитных полей [3]. При проведении исследований автором был использован МКР для расчета задачи магнитостатики, которому в литературе уделено незаслуженно мало внимания, хотя он обладает простой реализацией, высокой вычислительной эффективностью, устойчивостью при моделировании нестационарных процессов, гибкостью в аппроксимации физических процессов, а также позволяет сразу получать значения искомых функций в узлах расчетной сетки. Особое внимание уделялось повышенной точности вычислений для уравнений магнитостатики на границах постоянных магнитов, где имеется разрыв первого рода функции намагниченности. Для решения данной проблемы рассмотрен вывод консервативной конечно-разностной схемы для уравнения магнитостатики со скалярным магнитным потенциалом на основе интегро-интерполяционного метода.

Уравнения магнитостатики для скалярного магнитного потенциала

Для описания магнитного поля в областях, где отсутствует ток, используется скалярный магнитный потенциал [4]. В этих областях магнитное поле становится потенциальным, и его можно выразить через скалярную функцию в случае наличия областей с ненулевой намагниченностью и магнитной проницаемостью, зависящей от координаты [4]:

$$\nabla \cdot (\mu(\mathbf{r}) \nabla \Psi) = \nabla \mathbf{M}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость; Ψ – скалярный магнитный потенциал; \mathbf{M} – вектор намагниченности; \mathbf{r} – радиус-вектор.

В задачах плазмодинамики, как правило, значимая величина – индукция магнитного поля \mathbf{B} , входящая в уравнение Лоренца, которая зависит от напряженности магнитного поля \mathbf{H} и вычисляется по формулам, являющимся следствием уравнений Максвелла [4]:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}(\mathbf{r})), \quad \mathbf{H} = -\nabla \Psi. \quad (2)$$

Как видно из (2), для получения значений индукции магнитного поля необходимо вычислить скалярный магнитный потенциал Ψ . Рассмотрим данную задачу с применением МКР для постоянной по всему пространству магнитной проницаемости μ и функции $\mathbf{M}(\mathbf{r})$, имеющей разрывы первого рода в области определения функции Ψ .

Консервативная разностная схема для скалярного магнитного потенциала

Различные физические процессы характеризуются некоторыми интегральными законами сохранения (тепла, массы, энергии и т. д.). Дифференциальные уравнения получаются исходя из уравнения баланса для малого объема в предположении существования непрерывных производных, входящих в уравнение.

В случае использования МКР происходит переход от непрерывной среды к некоторой ее дискретной модели, при которой производные заменяются их дискретными аналогами, а пространство представляет собой набор дискретных узлов [5]. При этом естественно требовать, чтобы выполнялись законы сохранения. Разностные схемы, выражающие на сетке законы сохранения, называются консервативными [5]. Получение консервативных разностных схем происходит из получения уравнений баланса для элементарных ячеек сеточной области. Входящие в эти уравнения баланса интегралы и производные заменяются приближенными разностными выражениями. Данный подход носит название интегро-интерполяционного метода [5].

Решение стационарных задач с помощью МКР сводится к добавлению в исходное уравнение фиктивной производной по времени, а выход на стационарное решение в таком случае достигается при $t \rightarrow \infty$. Данный подход называется методом релаксации или установления [5]. Рассмотрим краевую задачу для уравнения (1) с фиктивной производной по времени в двухмерном случае

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \mu \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} - \nabla \mathbf{M}(\mathbf{r}), \mu = \text{const.} \quad (3)$$

Формула (3) описывает нестационарное уравнение для скалярного магнитного потенциала. Задача (3) имеет единственное решение, если $\mathbf{M}(\mathbf{r})$ – кусочно-непрерывная функция и имеет разрывы первого рода вдоль контура областей с ненулевой намагниченностью. При этом должна соблюдаться непрерывность скалярного магнитного потенциала и напряженности магнитного поля в точках разрыва.

Рассмотрим интегральное уравнение баланса энергии для каждой элементарной ячейки $\Omega_{i,j}$ площадью $\Delta x \Delta y$ уравнения (3). Оно основывается на теоремах Гаусса и Остроградского – Гаусса [5]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\iint_{\Omega_{i,j}} \Psi(x, y, t) dx dy \right) = \oint_{\partial \Omega_{i,j}} \mu(\mathbf{r}) \mathbf{H} d\mathbf{S} + \iint_{\Omega_{i,j}} \nabla \mathbf{M}(\mathbf{r}) dx dy. \quad (4)$$

Для описания баланса в каждом узле необходимо преобразовать (4) в локальную форму путем деления всех частей уравнения на площадь единичной ячейки. Тогда левая часть (4) представляет собой производную от средней величины скалярного магнитного потенциала в ячейке с индексами i, j на временном шаге n

$$\frac{1}{\Delta x \Delta y} \frac{\partial}{\partial t} \left(\iint_{\Omega_{i,j}} \Psi(x, y, t) dx dy \right) \approx \frac{\partial \Psi_{i,j}^n}{\partial t} \approx \frac{\Psi_{i,j}^{n+1} - \Psi_{i,j}^n}{\Delta t}. \quad (5)$$

Правая часть уравнения (4) представляет собой выражение (2) для элементарной ячейки. При этом первое слагаемое правой части уравнения (4) является суммой потоков через все четыре грани ячейки, которые определяются как:

$$\frac{1}{\Delta x \Delta y} \oint_{\partial \Omega_{i,j}} \mu(\mathbf{r}) \mathbf{H} d\mathbf{S} \approx (\mathbf{H}_{i+1/2,j} \cdot \Delta y - \mathbf{H}_{i-1/2,j} \cdot \Delta y + \mathbf{H}_{i,j+1/2} \cdot \Delta x - \mathbf{H}_{i,j-1/2} \cdot \Delta x) / \Delta x \Delta y, \quad (6)$$

где

$$\mathbf{H}_{i+1/2,j} = -\mu \frac{\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i,j}}{\Delta x}; \quad \mathbf{H}_{i-1/2,j} = -\mu \frac{\Psi_{i,j} - \Psi_{i-1,j}}{\Delta x}. \quad (7)$$

Вдоль другой оси расчет проводится аналогично.

Подставляя уравнения (7) в (6), получим стандартное выражение для центральной разности

$$\frac{1}{\Delta x \Delta y} \oint_{\partial \Omega_{i,j}} \mu(\mathbf{r}) \mathbf{H} d\mathbf{S} \approx \frac{\mu}{\Delta x^2} (\Psi_{i+1,j} - 2\Psi_{i,j} + \Psi_{i-1,j}) + \frac{\mu}{\Delta y^2} (\Psi_{i,j+1} - 2\Psi_{i,j} + \Psi_{i,j-1}). \quad (8)$$

Для намагниченности ситуация аналогична, за исключением того, что если все грани магнита проходят через узлы сетки, нужно учитывать процент заполнения ячейки намагниченностью на границе раздела

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega_{i,j}} \nabla \mathbf{M}(\mathbf{r}) dx dy &= \oint_{\partial \Omega_{i,j}} \mathbf{M}(\mathbf{r}) d\mathbf{S} \approx \\ &\approx [M_x]_{i+1/2,j} \Delta s_y - [M_x]_{i-1/2,j} \Delta s_y + [M_y]_{i,j+1/2} \Delta s_x - [M_y]_{i,j-1/2} \Delta s_x, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\Delta s_x, \Delta s_y$ – длина стороны магнита, входящей в ячейку.

Для равномерной сетки на гранях магнита $\Delta s_x = \Delta x$, $\Delta s_y = \Delta y$, а на его углах $\Delta s_x = \Delta x/2$, $\Delta s_y = \Delta y/2$ (при условии, что углы попадают в узлы сетки). По сути, вычислять выражение (9) необходимо только для узлов, принадлежащих контуру магнита. Однако нужно отметить, что аппроксимация, аналогичная (7), не будет физически корректна ввиду того, что по данным формулам за границами магнита будет ненулевой поток, что неверно. Для исправления этого необходимо приписать нулевые значения для $[M_x]_{i+1/2,j}$, $[M_x]_{i-1/2,j}$ и других, находящихся за пределами магнита. Например, для левой и правой граней прямоугольного магнита Ω_m :

$$\begin{aligned} [M_x]_{i+1/2,j} &= 0, \text{ если } [M_x]_{i+1,j} \notin \Omega_m, \text{ иначе } [M_x]_{i+1/2,j} = [M_x]_{i+1,j}; \\ [M_x]_{i-1/2,j} &= [M_x]_{i-1,j}, \text{ если } [M_x]_{i-1,j} \in \Omega_m, \text{ иначе } [M_x]_{i-1/2,j} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Для вертикальных компонент следует поступать аналогично.

Применение рассмотренной схемы для прямоугольного магнита в двухмерном случае

Пусть $\Omega \in \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 \text{ м} \leq x \leq 1 \text{ м}; 0 \text{ м} \leq y \leq 1 \text{ м}\}$ – прямоугольная область, для которой справедливо уравнение (3). Зададим для контура расчетной области условие Дирихле $\Psi(x, y) = 0 \text{ A}, \forall (x, y) \in \partial\Omega$. Внутри этой области находится прямоугольный магнит $\Omega_m \in \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid 0,4 \text{ м} \leq x \leq 0,6 \text{ м}; 0,4 \text{ м} \leq y \leq 0,6 \text{ м}\}$ с однородной намагниченностью вдоль оси y : $\mathbf{M}(x, y) = (0, M_0), \forall (x, y) \in \Omega_m$ (где $M_0 = 10 \text{ A/m}$), $\mu = 1, \forall (x, y) \in \Omega$.

Разобьем пространство на равные интервалы длиной $\Delta x, \Delta y$ с числом узлов N_x, N_y так, чтобы узлы попадали на грани магнита. Координаты вдоль осей задаются как $x_i = i\Delta x, i = 0, 1, \dots, N_x - 1, N_x$, $y_i = j\Delta y, j = 0, 1, \dots, N_y - 1, N_y$, $t^{n+1} - t^n = \Delta t, n = 0, 1, \dots$. Пусть $N_x = N_y = 101$, тогда $\Delta x = \Delta y = 0,01 \text{ м}$.

Преобразуем уравнение (3) к конечно-разностному представлению в неявной форме с фиктивной производной по времени, которую будем решать методом дробных шагов [6], когда временной интервал Δt разбивается на два равных интервала: $n \rightarrow n + 1/2 \rightarrow n + 1$:

$$\frac{\Psi_{i,j}^{n+1} - \Psi_{i,j}^n}{\Delta t} = \mu \frac{\Psi_{i+1,j}^{n+1/2} - 2\Psi_{i,j}^{n+1/2} + \Psi_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \mu \frac{\Psi_{i,j+1}^{n+1} - 2\Psi_{i,j}^{n+1} + \Psi_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} - \operatorname{div} \mathbf{M}_{i,j}, \quad (11)$$

где $\Psi_{i,j}^n, \Psi_{i,j}^{n+1}$ – значение потенциала в момент времени n и $n+1$ соответственно.

Данная схема решается путем разбиения (11) на систему из двух уравнений, каждое из которых решается методом прогонки, что позволяет определить значения скалярного магнитного потенциала в момент времени $n+1$ [6]:

$$\frac{\Psi_{i,j}^{n+1/2} - \Psi_{i,j}^n}{\Delta t / 2} = \mu \frac{\Psi_{i+1,j}^{n+1/2} - 2\Psi_{i,j}^{n+1/2} + \Psi_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} - \operatorname{div} \mathbf{M}_{i,j}; \quad \frac{\Psi_{i,j}^{n+1} - \Psi_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta t / 2} = \mu \frac{\Psi_{i,j+1}^{n+1} - 2\Psi_{i,j}^{n+1} + \Psi_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2}. \quad (12)$$

Поток намагниченности для всех узлов вычисляется по уравнениям (9), (10). Расчет напряженности магнитного поля производится исходя из центральной разности для узлов, не являющихся граничными [6]:

$$[H_x]_{i,j} = -\frac{\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j}}{2\Delta x}; \quad [H_x]_{i,j} = -\frac{\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j-1}}{2\Delta y}. \quad (13)$$

В случае, если узел является граничным, т. е. проходит по грани магнита, необходимо использовать правую или левую разность в зависимости от направления вектора нормали к поверхности ввиду наличия разрыва первого рода и неприменимости центрально-разностной аппроксимации. Правая и левая разности с порядками аппроксимации $O(h)$ и $O(h^2)$ для горизонтальной компоненты вектора \mathbf{H} [6] соответственно запишутся:

$$[H_x]_{i,j} = -\frac{\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i,j}}{\Delta x}; \quad [H_x]_{i,j} = -\frac{\Psi_{i,j} - \Psi_{i-1,j}}{\Delta x}; \quad (14)$$

$$[H_x]_{i,j} = -\frac{-3\Psi_{i,j} + 4\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i+2,j}}{2\Delta x}; \quad [H_x]_{i,j} = -\frac{3\Psi_{i,j} - 4\Psi_{i-1,j} - \Psi_{i-2,j}}{2\Delta x}. \quad (15)$$

Ввиду того, что сама разностная схема (12) обладает порядком аппроксимации $O(h^2)$, аппроксимация с тем же порядком для граничных узлов (15) является более предпочтительной и будет в дальнейшем использоваться в расчетах.

Компоненты индукции магнитного поля определяются согласно (2)

$$[B_x]_{i,j} = \mu_0 \mu \left([H_x]_{i,j} + [M_x]_{i,j} \right); [B_y]_{i,j} = \mu_0 \mu \left([H_y]_{i,j} + [M_y]_{i,j} \right). \quad (16)$$

Оценка сходимости решения производится по максимальной норме $\|\varepsilon\|_\infty$ разницы значений потенциала на текущем и предыдущем шагах вычислений и по невязке R , определяющей отклонение численного решения от истинного [5, 6]:

$$\|\varepsilon\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq N_x, 1 \leq j \leq N_y} |\Psi_{i,j}^{n+1} - \Psi_{i,j}^n|;$$

$$R_{i,j} = \left| \frac{\Psi_{i,j}^{n+1} - \Psi_{i,j}^n}{\Delta t} - \mu \frac{\Psi_{i+1,j}^{n+1} - 2\Psi_{i,j}^{n+1} + \Psi_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu \frac{\Psi_{i,j+1}^{n+1} - 2\Psi_{i,j}^{n+1} + \Psi_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} + \text{div} \mathbf{M}_{i,j} \right|. \quad (17)$$

Результаты исследований и их обсуждение

Расчет прямоугольного постоянного магнита, заданного согласно условиям предыдущего раздела, выполнялся с помощью языка программирования Python 3.11 и библиотеки Taichi, используемой для ускорения расчетов с помощью видеокарты. На рис. 1, *a* для визуальной наглядности показан пример расчетной сетки, состоящей из 26×26 узлов (все дальнейшие рисунки представлены для сетки, состоящей из 101×101 узлов). Синим цветом отмечены узлы, принадлежащие магниту. Завершение итераций производилось исходя из нормы (17), которая в рассматриваемом случае задавалась как 10^{-12} . Выбор шага по времени существенно влияет на результат решения и в идеальном варианте должен быть как можно меньше. Но в таком случае число итераций будет слишком велико, что не является рациональным по затратам времени расчета. Поэтому предпочтительнее использовать переменный шаг по времени, который в рассматриваемом случае ступеньчато уменьшался с увеличением числа итераций, что показано на рис. 1, *b*.

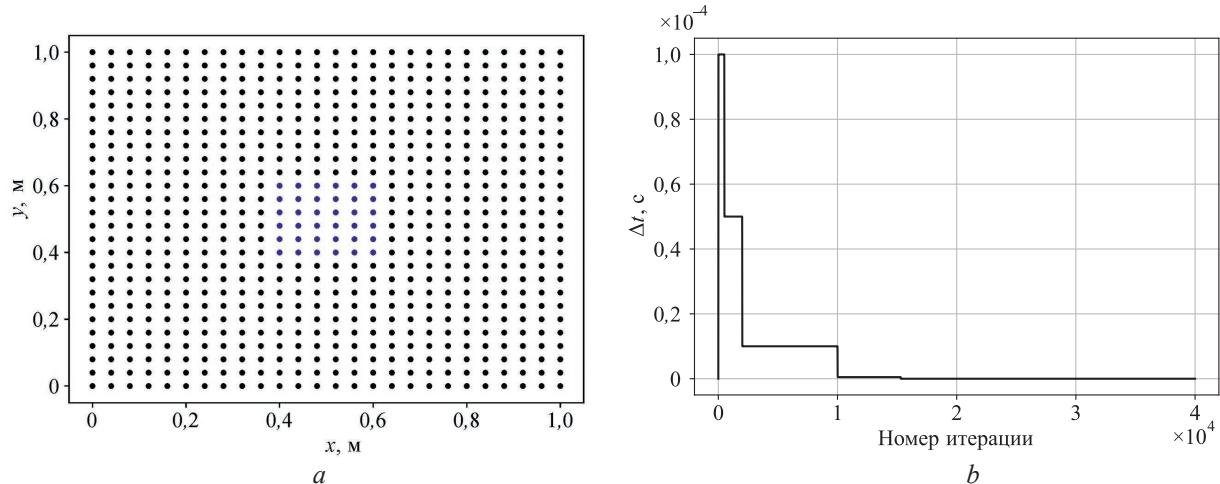


Рис. 1. Пример расчетной сетки (*a*) и зависимость шага по времени от номера итерации (*b*)

Fig. 1. An example of a computational grid (*a*) and the dependence of the time step on the iteration number (*b*)

Применение переменного шага по времени позволяет достичь лучшей сходимости с меньшей погрешностью решения. В исследуемом случае достижение сходимости наблюдалось к 15 000 шагу, при котором норма становилась меньше 10^{-12} . Время расчета – примерно 15 с. Следует отметить, что возможно применение адаптивного шага по времени – это позволяет существенно снизить число необходимых итераций до 1–2 тыс. с такой же точностью решения.

Визуализация полей нормальной компоненты намагниченности и результат расчета дивергенции намагниченности показаны на рис. 2.

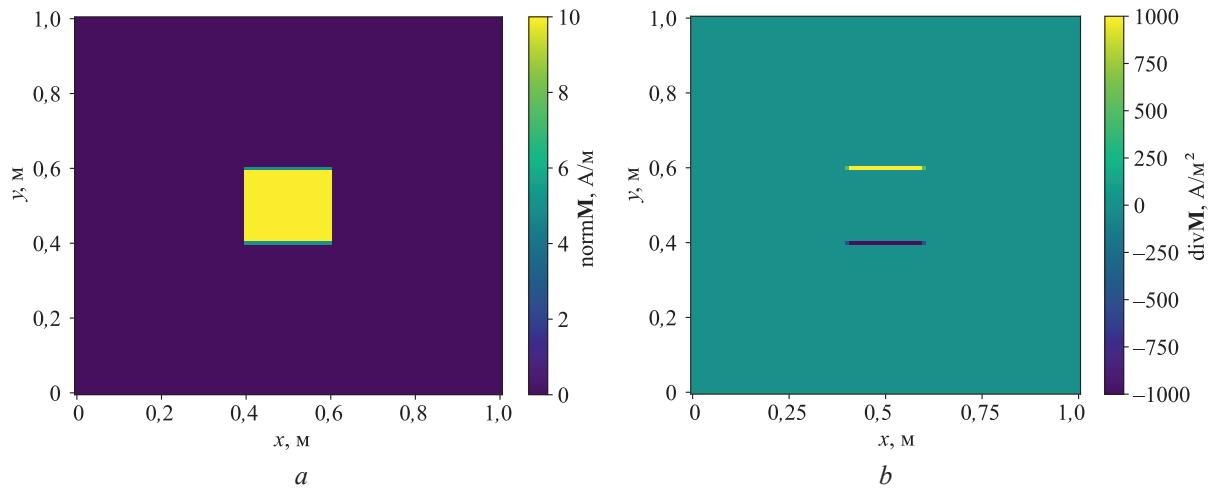


Рис. 2. Визуализация полей нормальной компоненты намагниченности (a)

и результат расчета дивергенции намагниченности (b)

Fig. 2. Visualization of the fields of the normal component of magnetization (a) and the result of calculating the divergence of magnetization (b)

Следует отметить, что значения на полюсах и краях магнита в случае равномерной сетки делятся пополам для выполнения условия консервативности.

На рис. 3 показан результат расчета скалярного магнитного потенциала и нормальной компоненты напряженности магнитного поля, на рис. 4 – нормальной компоненты индукции магнитного поля и невязки для каждого узла.

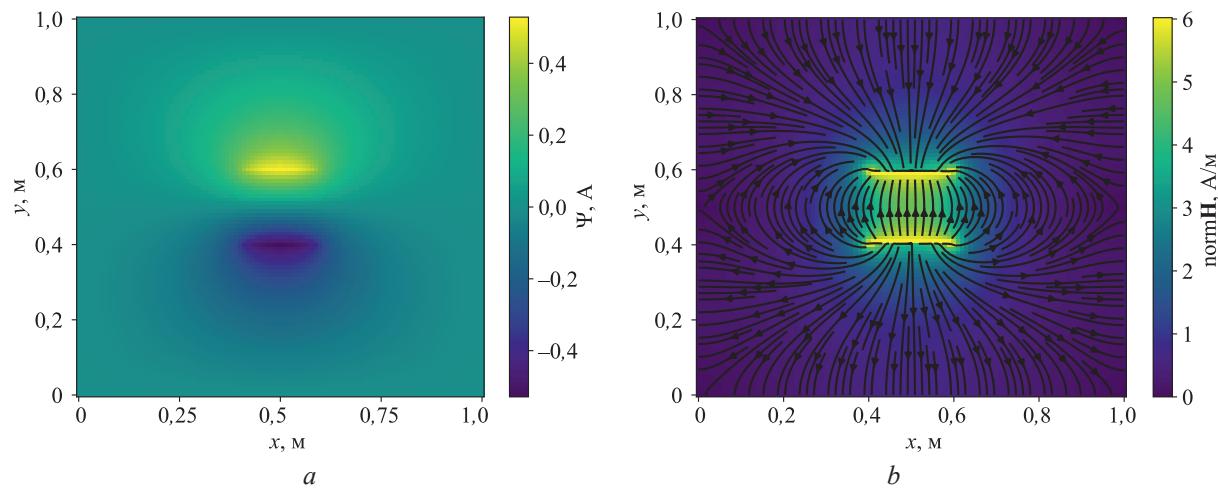


Рис. 3. Результат расчета скалярного магнитного потенциала (a)

и нормальной компоненты напряженности магнитного поля (b)

Fig. 3. The result of calculating the scalar magnetic potential (a) and the normal component of the magnetic field strength (b)

Сравнение результатов расчета потенциала вдоль линий, лежащих на вертикальной и горизонтальной гранях магнита $\Psi(x; 0,6 \text{ м})$, $\forall x \in [0;1] \text{ м}$ и $\Psi(0,6 \text{ м}; y)$, $\forall y \in [0;1] \text{ м}$, с решением, полученным с помощью МКР и МКЭ, показано на рис. 5.

Из рис. 5, b видно, что невязка принимает значение меньше 0,1 для большей части расчетной области. При этом самая большая погрешность наблюдается на углах магнита, что связано с недостаточной точностью аппроксимации второй производной. Погрешность рассчитывалась по формуле

$$\Delta = \left| \frac{[\Psi_{i,j}]_{\text{МКЭ}} - [\Psi_{i,j}]_{\text{МКР}}}{[\Psi_{i,j}]_{\text{МКЭ}}} \right| \cdot 100 \%. \quad (18)$$

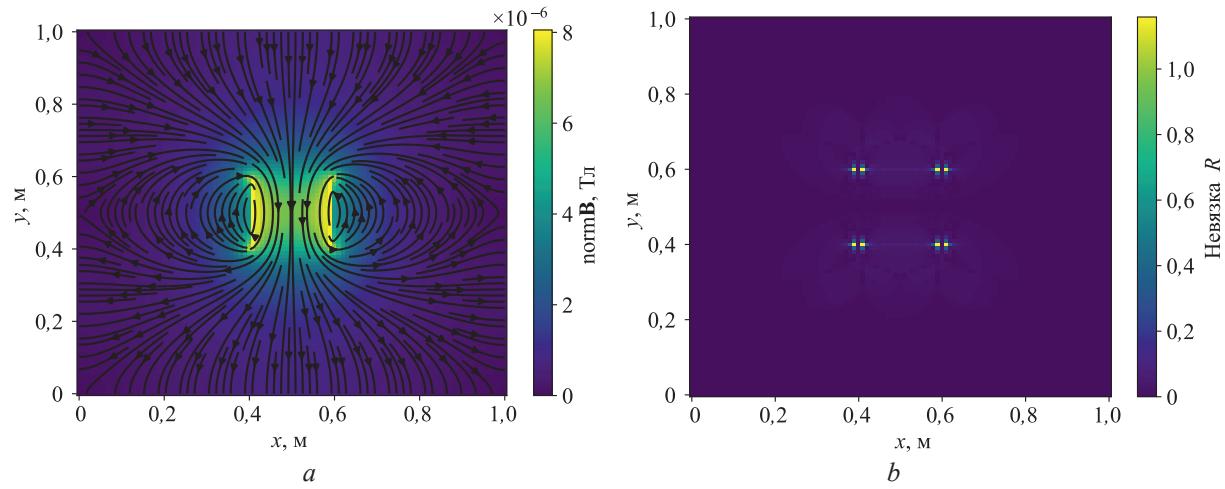


Рис. 4. Результат расчета нормальной компоненты индукции магнитного поля (a) и невязки для каждого узла (b)

Fig. 4. The result of calculating the normal component of the magnetic field induction (a) and the residual for each node (b)

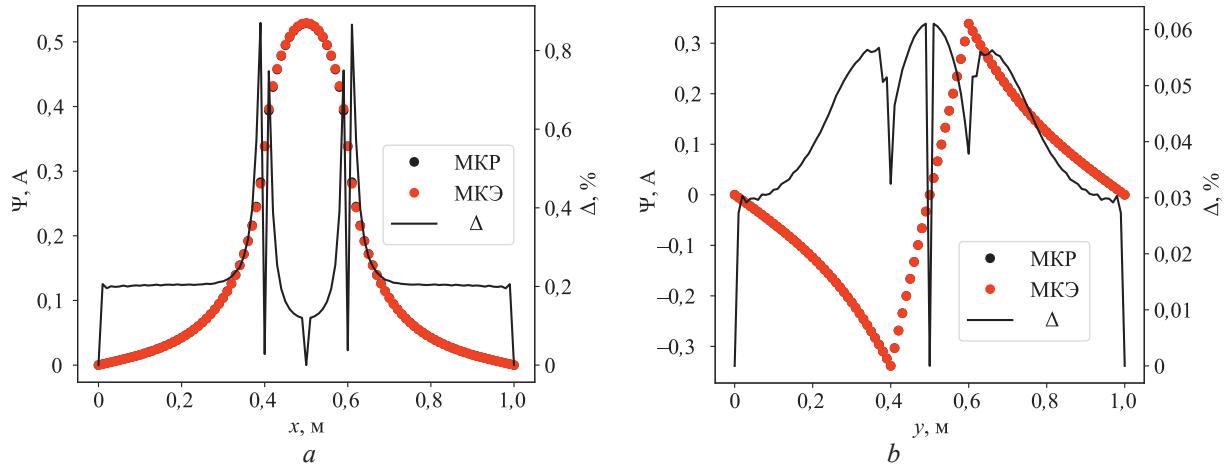


Рис. 5. Сравнение расчета потенциала с помощью метода конечных разностей и метода конечных элементов вдоль граней магнита: a – $\Psi(x; 0,6 \text{ м})$, $\forall x \in [0; 1] \text{ м}$; b – $\Psi(0,6 \text{ м}; y)$, $\forall y \in [0; 1] \text{ м}$

Fig. 5. Comparison of potential calculation using the finite difference method and the finite element method along the magnet faces: a – $\Psi(x; 0,6 \text{ м})$, $\forall x \in [0; 1] \text{ m}$; b – $\Psi(0,6 \text{ м}; y)$, $\forall y \in [0; 1] \text{ m}$

Из рис. 5 видно, что погрешность составляет менее 1 %. Наибольшая погрешность, соответствующая невязке, наблюдается на углах магнита, однако значения потенциала за пределами магнита вычисляются корректно.

Заключение

1. Для реализации расчета магнитного поля постоянных магнитов с точностью, необходимой для решения задач плазмодинамики в технологических разрядных устройствах, выполнен вывод консервативной разностной схемы решения уравнения магнитостатики со скалярным магнитным потенциалом на основе интегро-интерполяционного метода.

2. С целью проверки полученной схемы была написана программа с использованием языка программирования Python 3.11 и библиотеки Taichi, в которой рассматривался пример расчета прямоугольного магнита в двухмерном случае. Расчет выполнялся с перемененным шагом по времени для достижения быстрой сходимости, оценка которой производилась исходя из определения разности между истинным и численным решениями, а также из сравнения имеющегося решения с решением, полученным с помощью метода конечных элементов. Разница между истинным и численным решением для 15 тыс. итераций дала среднее значение менее 0,2 с наиболь-

шим отклонением в углах магнита, что связано с недостаточной точностью аппроксимации второй производной. Сравнение с методом конечных элементов показывает среднюю погрешность менее 1 %.

3. Полученные результаты позволяют с достаточной точностью выполнять расчет магнитных систем на постоянных магнитах технологических распылительных устройств и других компонентов оборудования для производства изделий микро- и оптоэлектроники.

Список литературы / References

1. Greene J. E. (2017) Review Article: Tracing the Recorded History of Thin-Film Sputter Deposition: From the 1800s to 2017. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 35 (5), 1–61. <https://doi.org/10.1116/1.4998940>.
2. Golosov D. A. (2017) Balanced Magnetic Field in Magnetron Sputtering Systems. *Vacuum*. 139, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.02.018>.
3. Peiró J., Sherwin S. (2005) Finite Difference, Finite Element and Finite Volume Methods for Partial Differential Equations. *Handb. Mater. Model. Springer*. 1, 2415–2446.
4. Bronzan J. B. (1971) The Magnetic Scalar Potential. *Amer. J. Phys.* 39, 1357–1359. <https://doi.org/10.1119/1.1976655>.
5. Samarskiy A. A. (1977) *Theory of Difference Schemes*. Moscow, Nauka Publishing House (in Russian).
6. Koltsova E. M., Skichko A. S., Zhensa A. V. (2021) *Numerical Methods for Solving Equations of Mathematical Physics and Chemistry*. Moscow, Yurayt Publishing House (in Russian).

Поступила 29.09.2025

Принята в печать 31.10.2025

Received: 29 September 2025

Accepted: 31 October 2025

Сведения об авторе

Шекелевский В. В., асп. каф. микро- и наноэлектроники, мл. науч. сотр. Центра междисциплинарных исследований, 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 29 987-16-66
E-mail: ivadim2703@gmail.com
Шекелевский Вадим Владимирович

Information about the author

Shakialeuski V. U., Postgraduate of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Junior Researcher at the Center for Interdisciplinary Research, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 987-16-66
E-mail: ivadim2703@gmail.com
Shakialeuski Vadzim Uladzimiravich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-56-64>

УДК 537.874; 620.22

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАЖЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ МНОГОСЛОЙНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

А. Д. ГЛАДИНОВ, О. В. БОЙПРАВ, В. А. БОГУШ

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

Аннотация. Представлены результаты исследований характеристик отражения и передачи экранов электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне, представляющих собой полимерные подложки с многослойными покрытиями, состоящими из слоя магнитного сплава систем Fe–Ni, Fe–Co или Ni–Co и подслоя Al или Al–Cu с поверхностным сопротивлением не более 0,1 Ом/кв. Приведены режимы нанесения таких покрытий и технологии изготовления экранов. Исследовано влияние включения в структуру покрытий рассматриваемых экранов подслоев Al и Al–Cu на значения их коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне. Установлено, что наименьшие значения коэффициентов отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2–17 ГГц (до –8,5 дБ) имеют экраны с покрытием системы Fe–Ni. При этом коэффициент передачи электромагнитного излучения в указанном диапазоне частот таких экранов составляет –11,8 дБ. Показано, что в результате включения в структуру покрытий этих экранов подслоев из Al и Cu значение их коэффициентов отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2–17 ГГц увеличивается до –0,1 дБ, а значение коэффициента передачи уменьшается до –31,3 дБ. Полученные данные можно использовать при разработке экранов электромагнитного излучения СВЧ-диапазона со сниженными массогабаритными параметрами.

Ключевые слова: СВЧ-излучение, тонкопленочные экраны, многослойные покрытия, электронно-лучевое испарение, коэффициенты отражения и передачи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гладинов, А. Д. Характеристики отражения и передачи многослойных тонкопленочных экранов электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне / А. Д. Гладинов, О. В. Бойправ, В. А. Богуш // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 56–64. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-56-64>.

REFLECTION AND TRANSMISSION CHARACTERISTICS OF MULTILAYER THIN-FILM SCREENS OF ELECTROMAGNETIC RADIATION IN THE MICROWAVE RANGE

ANTON D. GLADINOV, OLGA V. BOIPRAV, VADIM A. BOGUSH

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

Abstract. The article presents the results of studies of the characteristics of reflection and transmission of electromagnetic radiation screens in the microwave range, which are polymer substrates with multilayer coatings consisting of a layer of magnetic alloy of the Fe–Ni, Fe–Co or Ni–Co systems and an Al or Al–Cu sublayer with a surface resistance of no more than 0.1 Ohm/sq. The application modes for such coatings and screen manufacturing technologies are presented. The effect of the inclusion of Al and Al–Cu sublayers in the coating structure of the screens under consideration on the values of their reflection and transmission coefficients of microwave electromagnetic radiation is investigated. It is established that screens with a Fe–Ni coating have the lowest values of the reflection coefficients of electromagnetic radiation in the frequency range of 2–17 GHz (up to –8.5 dB). At the same time, the transmission coefficient of electromagnetic radiation in the specified frequency range of such screens is –11.8 dB. It was shown that by incorporating Al and Cu sublayers into the coating structure of these screens, their electromagnetic radiation reflectivity in the 2–17 GHz frequency range increases to –0.1 dB, while their transmission coefficient decreases to –31.3 dB. These data can be used in the development of microwave electromagnetic radiation screens with reduced weight and dimensions.

Keywords: microwave radiation, thin-film shields, multilayer coatings, electron beam evaporation, reflection and transmission coefficients.

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

For citation. Gladinov A. D., Boiprav O. V., Bogush V. A. (2025) Reflection and Transmission Characteristics of Multilayer Thin-Film Screens of Electromagnetic Radiation in the Microwave Range. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 56–64. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-56-64> (in Russian).

Введение

Экраны электромагнитного излучения (ЭМИ) представляют собой нанесенные на диэлектрические подложки покрытия, состоящие из слоев толщиной от нескольких нанометров до сотен микрометров, выполненные из материалов высокой проводимости и/или из магнитных материалов [1, 2]. Среди экранирующих покрытий ЭМИ особое место занимают тонкопленочные (толщиной до 1 мкм) металлические покрытия. Применяемые в настоящее время экранирующие покрытия обеспечивают электромагнитную защиту изделий электроники в корпусах из полимерных диэлектрических материалов. В случаях, когда защищаемый объект имеет сложный профиль поверхности, особые условия эксплуатации, например, в космосе, где важны его массогабаритные параметры, как правило, применяют многослойные экраны, состоящие из последовательно чередующихся слоев, выполненных из магнитных сплавов систем Fe–Ni, Fe–Co или Ni–Co, а также из высокопроводящих элементов, чаще всего из меди или алюминия, обеспечивающих получение слоев с поверхностным электросопротивлением на уровне 0,1 Ом/кв. Многослойные экраны характеризуются высокой эффективностью экранирования в L-, S-, C-, X- и K_u-диапазонах частот от 1 до 18 ГГц. Но вместе с тем у них высокий коэффициент отражения радиоволн, что обусловлено существенным различием волнового сопротивления металлических слоев и воздуха [3–5].

Сегодня наиболее перспективные области применения тонкопленочных покрытий экранирования ЭМИ – это аэрокосмические технологии (наноспутники), электротранспортные средства, беспилотные летательные аппараты. Актуальность использования тонкопленочных экранов в данных областях обусловлена повышенными требованиями к их массогабаритным параметрам.

В статье представлены результаты исследований в сфере создания тонкопленочных экранов ЭМИ СВЧ-диапазона [6–8]. Установлены закономерности изменения коэффициентов отражения S_{11} и передачи S_{21} ЭМИ в СВЧ-диапазоне многослойных тонкопленочных экранов, представляющих собой полимерные подложки с многослойными покрытиями, состоящими из слоя магнитного сплава систем Fe–Ni, Fe–Co или Ni–Co и подслоя Al и/или Cu, в зависимости от состава указанных слоев. Такие экраны, в отличие от ранее исследованных в [9, 10], обладают меньшими массогабаритными параметрами, что расширяет сферу их применения.

Методика проведения экспериментальных исследований

В ходе проведения исследований использовался измерительный модуль SNA 0.01-18. Измерения с применением этого модуля проводились в диапазоне частот 2–17 ГГц в соответствии с ГОСТ 20271.1–91 «Изделия электронные СВЧ. Методы измерения электрических параметров». Схема соединения блоков измерительного модуля SNA 0.01-18 при измерении S_{11} и S_{21} приведена на рис. 1, где ГКЧ – генератор качающейся частоты.

В качестве подложек использовались сотовый поликарбонат (ГОСТ Р 56712–2015) и полиметилметакрилат (ПММА, оргстекло, ГОСТ 17622–72). Размеры образцов в плане составляли 300×400 мм, толщина 4 мм. Внешний вид подложек и экрана ЭМИ показан на рис. 2.

Покрытия на полимерные подложки наносили с помощью модернизированной установки вакуумного напыления ВУ-1А. Схема формирования слоев электронно-лучевым испарением на полимерных подложках приведена на рис. 3. В качестве покрытий использовались системы, состоящие из токопроводящих и магнитных слоев. На подложки из ПММА наносили следующие системы покрытий: Al–Cu–(Fe–Ni), Al–Cu–(Fe–Co), Al–Cu–(Ni–Co) и Al–(Fe–Ni); на подложки из поликарбоната – слои из сплавов систем Fe–Ni, Fe–Co и Ni–Co. Для приготовления сплавов и нанесения пленок использовали металлы следующих марок: алюминий A₅N, медь M0, кобальт K1, АРМКО-железо, никель H0. Сплавы систем Fe–Ni, Fe–Co и Ni–Co являлись азеотропными и имели химические составы, масс.-%: Fe₅₅Ni₄₅, Fe₅₄Co₄₆, Ni₄₉Co₅₁.

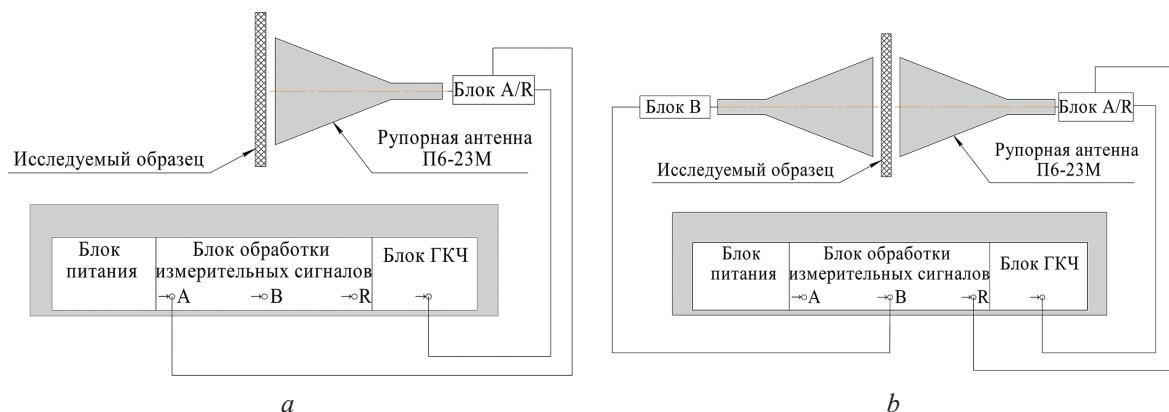


Рис. 1. Схема соединения блоков измерительного модуля SNA 0.01-18 при измерении: *a* – S_{11} ; *b* – S_{21}
Fig. 1. Connection diagram of the SNA 0.01-18 measuring module blocks during measurement: *a* – S_{11} ; *b* – S_{21}



Рис. 2. Внешний вид подложек из сотового поликарбоната (*a*) и оргстекла (*b*)
и экрана электромагнитного излучения (*c*)
Fig. 2. External appearance of substrates made of cellular polycarbonate (*a*) and organic glass (*b*)
and an electromagnetic radiation screen (*c*)

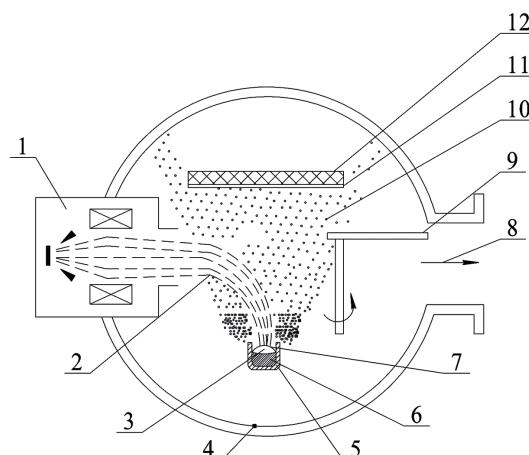


Рис. 3. Схема формирования слоев электронно-
лучевым испарением металлов на полимерную подложку: 1 – электронная пушка;
2 – электронный пучок; 3 – поверхность, бомбардируемая пучком; 4 – кожух технологической камеры;
5 – молибденовый тигель; 6 – испаряемый металл; 7 – поверхность испарения; 8 – откачка вакуумной камеры;
9 – диафрагма испарителя; 10 – поток пара; 11 – напыляемый слой; 12 – полимерная подложка
Fig. 3. Schematic diagram of the formation of layers by electron-beam evaporation of metals on a polymer substrate:
1 – electron gun; 2 – electron beam; 3 – surface bombarded by the beam;
4 – process chamber housing; 5 – molybdenum crucible; 6 – evaporated metal; 7 – evaporation surface;
8 – vacuum chamber pumping; 9 – evaporator diaphragm; 10 – vapor flow;
11 – deposited layer; 12 – polymer substrate

Общая методика изготовления экранов ЭМИ состояла из следующих этапов.

1. Подготовка подложек размерами $300 \times 400 \text{ мм}^2$.
2. Обезжиривание рабочих поверхностей полимерных подложек перед нанесением покрытий.
3. Высушивание подложек после обезжиривания на воздухе в течение 10 мин.
4. Подготовка металлов/сплавов перед нанесением в соответствии с табл. 1.
5. Загрузка металлов/сплавов в молибденовые тигли.
6. Загрузка полимерной подложки, обезжиренной и высушенной в результате реализации этапов 2–3, в вакуумную камеру электронно-лучевой установки.
7. Установка молибденовых тиглей, загруженных сплавами в результате реализации этапа 5, в вакуумную камеру установки таким образом, чтобы расстояние S между графитовыми тиглями и полимерной подложкой было согласно табл. 2.
8. Запуск установки электронно-лучевого испарения и выполнение процедуры нанесения покрытий в соответствии с режимами из табл. 2.
9. Отключение установки электронно-лучевого испарения и по истечении 1800 с извлечение из нее полученного электромагнитного экрана.

В табл. 1 приведены системы покрытий и толщина слоев покрытий, а также общая толщина нанесенных на образцы экранов покрытий.

Таблица 1. Системы и толщины слоев покрытий на экранах электромагнитного излучения
Table 1. Systems and thicknesses of coating layers on electromagnetic radiation screens

Номер образца экрана	Система покрытия	Толщина слоя покрытия, нм					Тип полимерной подложки	Общая толщина покрытия, нм
		Al	Cu	Fe–Ni	Fe–Co	Ni–Co		
1	Fe–Ni	–	–	150	–	–	Поликарбонат	150
2	Al–(Fe–Ni)	150	–	150	–	–	ПММА	300
3	Al–Cu–(Fe–Ni)	150	150	150	–	–	ПММА	450
4	Fe–Co	–	–	–	150	–	Поликарбонат	150
5	Al–Cu–(Fe–Co)	150	150	–	150	–	ПММА	450
6	Ni–Co	–	–	–	–	150	Поликарбонат	150
7	Al–Cu–(Ni–Co)	150	150	–	–	150	ПММА	450

Согласно табл. 1, толщина каждого нанесенного слоя в покрытиях составляла 150 нм. Режимы нанесения слоев покрытий методом электронно-лучевого испарения приведены в табл. 2.

Таблица 2. Режимы нанесения слоев покрытий
Table 2. Coating layer application modes

Система покрытия	Параметр						
	p , Па	$T_{\text{подл}}$, °C	t , с	v , нм/с	$T_{\text{исп}}$, °C	S , мм	$m_{\text{нав}}$, г
Al	$5 \cdot 10^{-2}$	40	30	5	1100	400	30
Cu			75	2	1300	350	20
Fe–Ni			150	1	1800	350	20
Fe–Co			150	1	1580	350	20
Ni–Co			150	1	1575	350	20

Обозначения: p – давление в вакуумной камере; $T_{\text{подл}}$ – температура подложки; t – время нанесения покрытия; v – скорость нанесения покрытия; $T_{\text{исп}}$ – температура испарения; S – расстояние от тигля до подложки; $m_{\text{нав}}$ – масса навески.

Результаты исследований и их обсуждение

Частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} образцов экранов № 1, 2, 3 системы Fe–Ni представлены на рис. 4. Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов, изготовленных на основе покрытия системы Fe–Ni (рис. 4, a, кривая 1) изменяются в пределах от (–0,9) до (–8,5) дБ. Значения S_{11} экранов с предварительно нанесенными на подложку токопроводящими слоями Al и Al–Cu (рис. 4, a, кривые 2 и 3) увеличиваются во всем исследованном диапазоне частот ЭМИ и изменяются в пределах от (–0,2) до (–2,5) дБ и от (–0,1) до (–2,3) дБ соответственно.

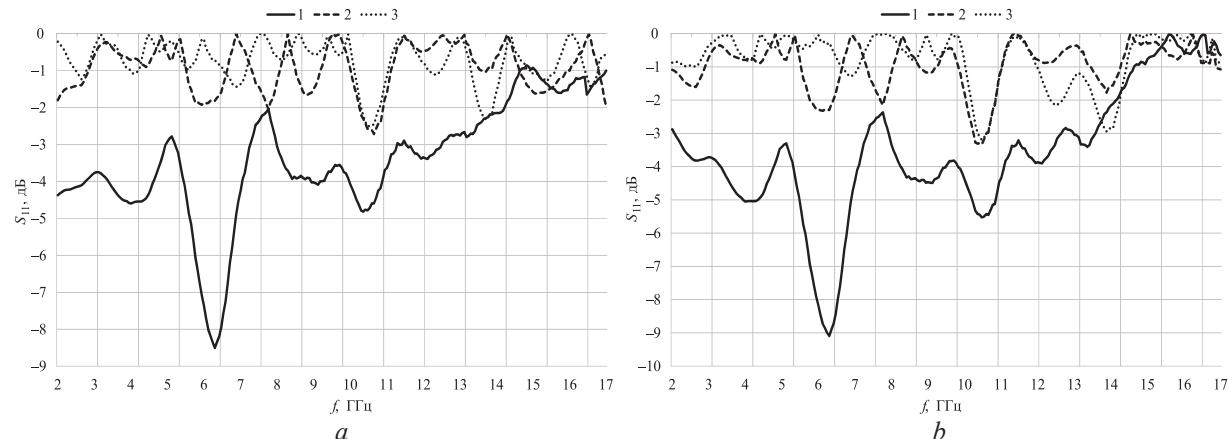


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения образцов экранов № 1 (кривые 1), № 2 (2) и № 3 (3) при измерении: *a* – без отражателя; *b* – с отражателем

Fig. 4. Frequency dependence of the reflection coefficient of screen samples No 1 (curves 1), No 2 (2) and No 3 (3) during measurement: *a* – without reflector; *b* – with reflector

Коэффициент отражения S_{11} экранами системы Fe–Ni при измерении с металлическим отражателем в диапазоне частот 2–17 ГГц изменяется от (–0,1) до (–9,0) дБ, а при предварительном нанесении токопроводящих слоев Al или Al–Cu – от (–0,1) до (–3,2) дБ и от (–0,1) до (–3,0) дБ соответственно.

Для системы Fe–Ni свойственно резонансное согласование, проявляющееся в пикообразных уменьшениях значений коэффициента отражения S_{11} в частотных диапазонах 3–5, 5–7 и 10–11 ГГц (рис. 4, a, кривая 1). Нанесение слоев Al и Cu приводит к обратному эффекту, т. е. к отражению большей части энергии ЭМИ, что проявляется в скачкообразном увеличении коэффициента S_{11} во всем исследованном частотном диапазоне (рис. 4, a, кривые 2 и 3 соответственно). Увеличение резонанса при измерениях коэффициента отражения S_{11} с металлическим отражателем особенно сильно проявляется в частотных диапазонах 5–6 и 10–11 ГГц (рис. 4, b).

Частотные зависимости S_{11} образцов экранов № 4 и 5 системы Fe–Co представлены на рис. 5. Значения S_{11} экранов с покрытием Fe–Co (рис. 5, a, кривая 1) изменяются в пределах от (–0,1) до (–3,7) дБ.

Предварительное нанесение на подложки слоев Al и Cu приводит к изменению коэффициента отражения ЭМИ покрытием Al–Cu–(Fe–Co) от (–0,1) до (–2,6) дБ. При измерении с отражателем (рис. 5, b) значения S_{11} для системы Fe–Co изменяются от (–0,1) до (–3,6) дБ, а при предварительном нанесении токопроводящих слоев Al и Cu – от (–0,1) до (–2,6) дБ (рис. 5, b, кривые 1 и 2 соответственно).

Система покрытия Fe–Co, по сравнению с Fe–Ni, обладает более чем в два раза большим значением S_{11} во всем исследованном диапазоне частот. Коэффициент отражения экрана с покрытием системы Ni–Co в диапазоне частот 2–17 ГГц изменяется от (–0,2) до (–2,7) дБ (рис. 6, a, кривая 1), а при предварительном нанесении на подложки слоев Al и Cu – от (–0,1) до (–2,6) дБ (рис. 6, a, кривая 2).

Частотные зависимости S_{11} образцов экранов № 6 и 7 системы Ni–Co представлены на рис. 6.

При измерениях с металлическим отражателем значения S_{11} экранов № 6 и 7 изменяются от (–0,1) до (–2,6) дБ и от (–0,1) до (–2,8) дБ соответственно (рис. 6, b, кривые 1 и 2).

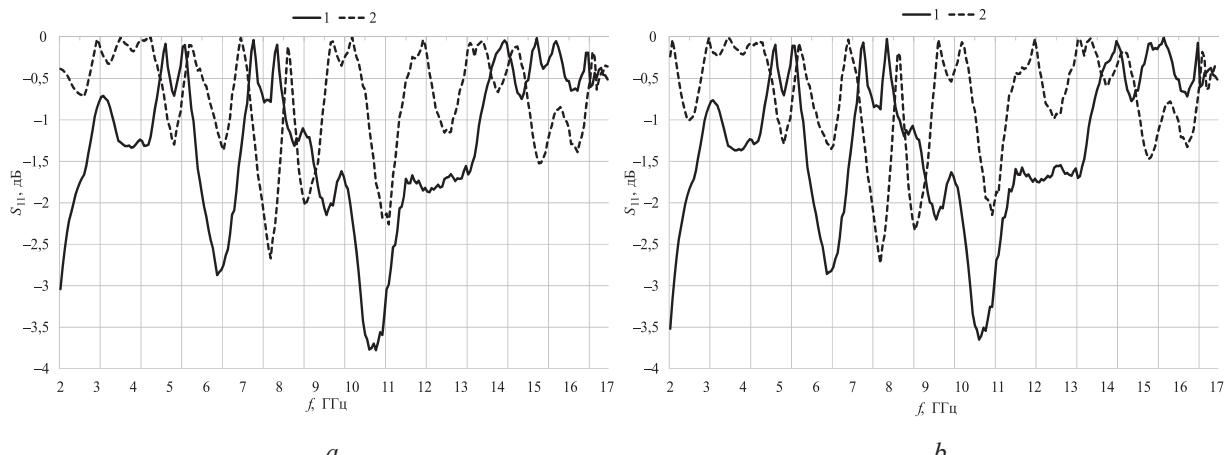


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента отражения образцов экранов № 4 (кривые 1) и № 5 (2) при измерении: *a* – без отражателя; *b* – с отражателем

Fig. 5. Frequency dependence of the reflection coefficient of screen samples No 4 (curves 1) and No 5 (2) during measurement: *a* – without reflector; *b* – with reflector

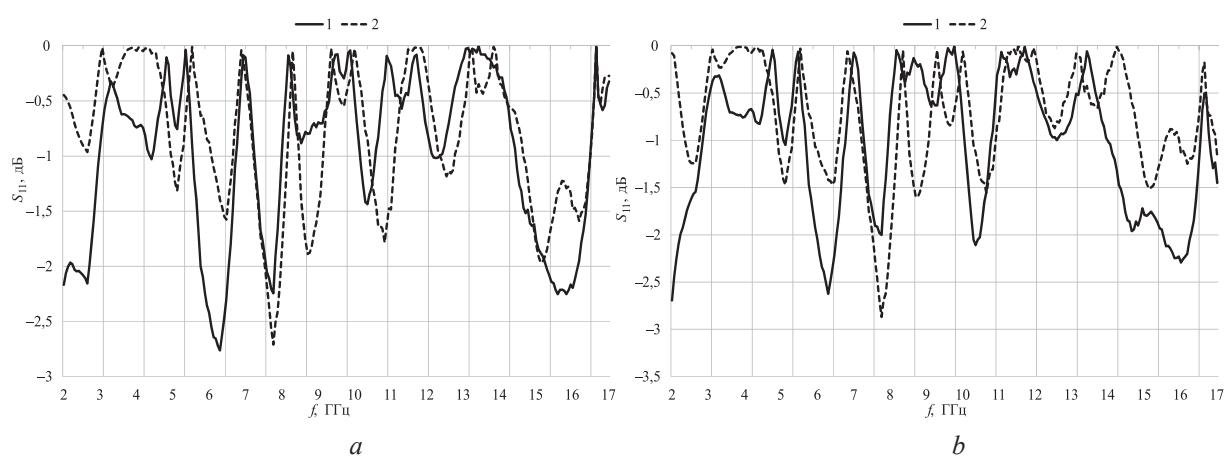


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента отражения образцов экранов № 6 (кривые 1) и № 7 (2) при измерении: *a* – без отражателя; *b* – с отражателем

Fig. 6. Frequency dependence of the reflection coefficient of screen samples No 6 (curves 1) and No 7 (2) during measurement: *a* – without reflector; *b* – with reflector

В сравнении с системами Fe–Ni и Fe–Co система Ni–Co проявляет наибольшее количество резонансных пиков, имеющих место в частотных диапазонах 5–6, 7–8, 10–11 и 14–16 ГГц.

Результаты измерений коэффициента передачи S_{21} образцов экранов № 1–7 приведены на рис. 7.

Наименьшие значения S_{21} в диапазоне частот 2–17 ГГц, изменяющиеся в пределах от (–5) до (–11,8) дБ, имеют экраны с покрытием системы Fe–Ni (рис. 7, *a*, кривая 1). Наибольшие значения S_{21} , изменяющиеся в диапазоне (–32,2)–(–17,1) дБ, имеют экраны с покрытием системы Ni–Co (рис. 7, *c*, кривая 1). И это единственная система покрытия, при добавлении к которой токопроводящих слоев происходит не увеличение коэффициента передачи ЭМИ, а наоборот, уменьшение. Данное явление, скорее всего, связано с образованием твердых растворов замещения в покрытии системы Ni–Co, что приводит к уменьшению магнитной проницаемости и, как следствие, к ухудшению экранирующих характеристик. Поэтому необходимы дальнейшие исследования фазового состава и измерения магнитной проницаемости слоев. Экраны ЭМИ, содержащие магнитные и токопроводящие слои, характеризуются значениями коэффициента передачи излучения СВЧ-диапазона $S_{21} > -30$ дБ. Полученные результаты и методика изготовления тонкопленочных экранов могут быть использованы при создании экранов ЭМИ, отличающихся минимальной массой на единицу площади экранируемых объектов.

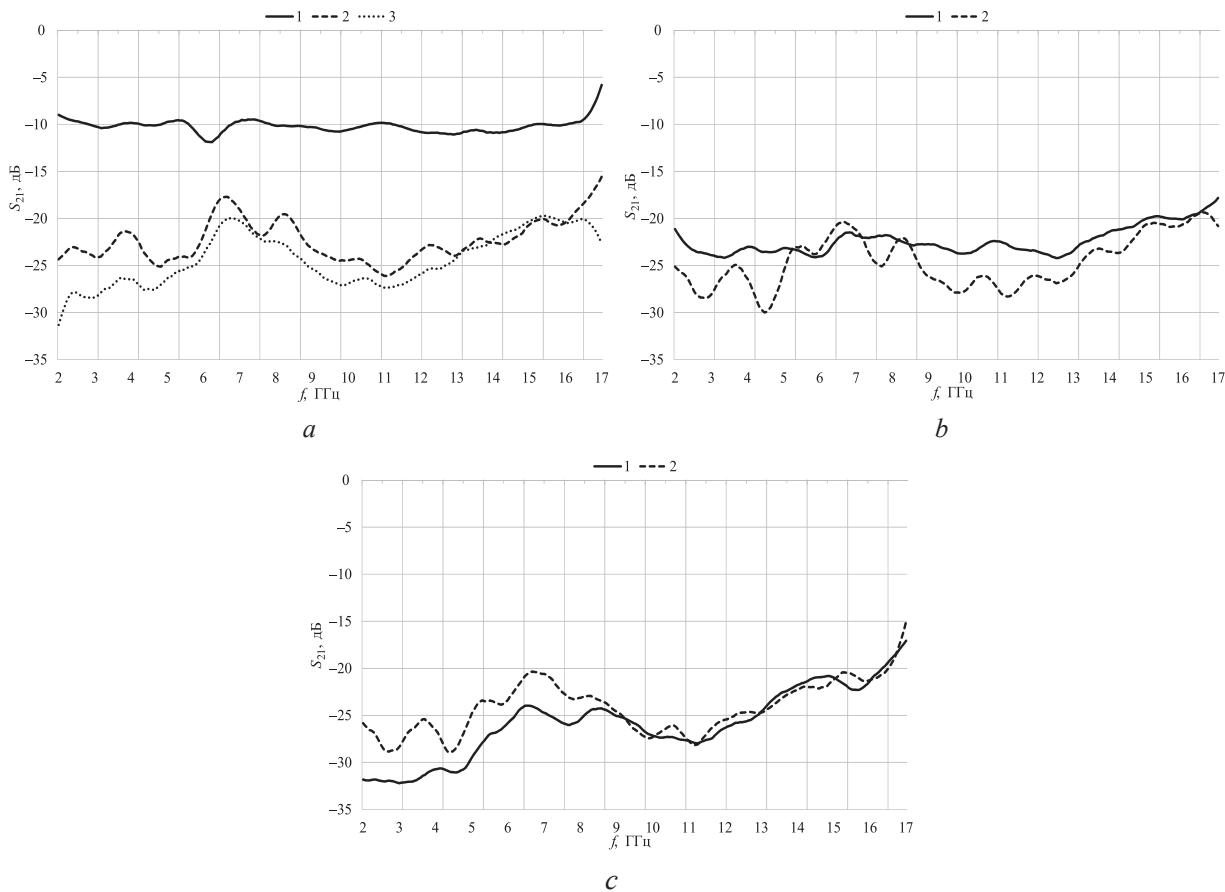


Рис. 7. Частотная зависимость коэффициента передачи образцов экранов:
 а – № 1, 2, 3 (кривые 1, 2, 3 соответственно);
 б – № 4, 5 (1, 2 соответственно);
 в – № 6, 7 (1, 2 соответственно)

Fig. 7. Frequency dependence of the transmission coefficient of screen samples:
 a – No 1, 2, 3 (curves 1, 2, 3 respectively);
 b – No 4, 5 (1, 2 respectively);
 c – No 6, 7 (1, 2 respectively)

Заключение

1. Установлено, что значения коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов с нанесенным на полимерную подложку слоем сплава Fe–Ni, Fe–Co или Ni–Co толщиной 150 нм изменяется соответственно в следующих пределах: (−0,9)–(−8,5) дБ, (−0,1)–(−3,7) дБ и (−0,1)–(−2,8) дБ. Коэффициент передачи данных экранов соответственно изменяется в следующих пределах: (−5)–(−11,8) дБ, (−17,8)–(−24,2) дБ и (−17,1)–(−32,2) дБ.

2. При нанесении на полимерную подложку подслоя Al толщиной 150 нм экран с покрытием системы Al–(Fe–Ni) имеет повышенные значения коэффициента отражения в пределах (−0,1)–(−3,2) дБ и коэффициента передачи в пределах (−15,5)–(−26,1) дБ. При нанесении подслоя Al–Cu толщиной 150 нм экраны систем Al–Cu–(Fe–Ni), Al–Cu–(Fe–Co) и Al–Cu–(Ni–Co) имеют более высокую эффективность экранирования электромагнитного излучения при значениях коэффициента отражения в диапазонах (−0,1)–(−3,0) дБ, (−0,1)–(−2,6) дБ и (−0,1)–(−2,7) дБ соответственно и коэффициента передачи в пределах (−20)–(−31,3) дБ, (−20)–(−30,1) дБ и (−15)–(−28,8) дБ соответственно.

3. Полученные результаты перспективны для применения в разработках аэрокосмических аппаратов, электротранспортных средств, беспилотных летательных аппаратов, а также при совершенствовании экранов электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, отличающихся минимальной массой на единицу площади экранируемых объектов.

Список литературы

1. Данилин, Б. С. Вакуумное нанесение тонких пленок / Б. С. Данилин. М.: Энергия, 1967.
2. Минайчев, В. Е. Нанесение пленок в вакууме / В. Е. Минайчев. М.: Высш. шк., 1989.
3. Holger, H. Development of New PVD Coatings for Magnesium Alloys with Improved Corrosion Properties / H. Hoche, S. Groß, M. Oechsner // *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 259. P. 102–108.
4. Берлин, Е. В. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / Е. В. Берлин, С. А. Двинин, Л. А. Сейдман. М.: Техносфера, 2007.
5. Проводящие и отражающие свойства тонких металлических пленок / И. В. Антонец [и др.] // Журнал технической физики. 2004. Т. 74, вып. 11.
6. Гладинов, А. Д. Конструкции экранов электромагнитного излучения на основе гофрированной металлизированной полимерной пленки / А. Д. Гладинов // Информационная безопасность: сб. матер. 60-й науч. конф. аспир., магистр. и студ. БГУИР, Минск, 22–26 апр. 2024 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2024. С. 39–43.
7. Гладинов, А. Д. Коэффициенты отражения и передачи покрытий систем Al–Fe–Ni и Al–Cu–Fe–Ni гибких экранов электромагнитного излучения / А. Д. Гладинов // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики: электрон. сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 14 нояб. 2024 г. Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т имени Евфросинии Полоцкой, 2025. С. 450–453.
8. Gladinov, A. D. S-Parameters of Flexible Electromagnetic Radiation Shields with Fe–Ni System Coating / A. D. Gladinov, O. V. Boiprav, V. A. Bogush // *Materials Physics and Mechanics*. 2024. Vol. 52, Iss. 5. P. 74–82.
9. Особенности синтеза многослойных структур на основе электролитически осажденных пленок никель–железо и эффективность их радиационной защиты / С. С. Грабчиков [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2017. № 2. С. 23–29.
10. Электрохимически осажденные покрытия на основе висмута и эффективность их защиты от электронного излучения / Д. И. Тишкевич [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2017. № 3. С. 19–29.

Поступила 17.10.2025

Принята в печать 28.11.2025

References

1. Danilin B. S. (1967) *Vacuum Deposition of Thin Films*. Moscow, Energy Publ. (in Russian).
2. Minaichev V. E. (1989) *Application of Films in Vacuum*. Moscow, Higher School Publ. (in Russian).
3. Holger H., Groß S., Oechsner M. (2014) Development of New PVD Coatings for Magnesium Alloys with Improved Corrosion Properties. *Surface and Coatings Technology*. 259, 102–108.
4. Berlin E. V., Dvinin S. A., Seidman L. A. (2007) *Vacuum Technology and Equipment for Deposition and Etching of Thin Films*. Moscow, Tekhnosfera Publ. (in Russian).
5. Antonets I. V., Kotov L. N., Nekipelov S. V., Karpushov E. V. (2004) Conductive and Reflective Properties of Thin Metal Films. *Journal of Technical Physics*. 74 (11) (in Russian).
6. Gladinov A. D. (2024) Designs of Electromagnetic Shields Based on Corrugated Metallized Polymer Film. *Information Security, Collection of Materials of the 60th Scientific Conference of Postgraduate, Master's and Undergraduate Students of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*. 39–43 (in Russian).
7. Gladinov A. D. (2025) Reflection and Transmission Coefficients of Al–Fe–Ni and Al–Cu–Fe–Ni Coatings of Flexible Electromagnetic Radiation Shields. *Actual Problems of Physics, Electronics and Power Engineering, Electronic Collection of Articles of the II International Scientific and Practical Conference*. 450–453 (in Russian).
8. Gladinov A. D., Boiprav O. V., Bogush V. A. (2024) S-Parameters of Flexible Electromagnetic Radiation Shields with Fe–Ni System Coating. *Materials Physics and Mechanics*. 52 (5), 74–82.
9. Grabchikov S. S., Lastovskii S. B., Solobai A. A., Trukhanov A. V., Chushkova D. I. (2017) Synthesis Features and Radiation Protection Efficiency of Multilayer Structures Based on Ni–Fe Electrodeposited Films. *News of the National Academy of Sciences of Belarus. Gray Physics-Technical Sciences*. (2), 23–29 (in Russian).
10. Tishkevich D. I., Bogatyrev Y. V., Grabchikov S. S., Lastovskii S. B., Tsybulskaya L. S., Shendyukov V. S., et al. (2017) Electrochemical Deposited Bismuth Coatings and the Efficiency of Their Protection from Electron Irradiation. *News of the National Academy of Sciences of Belarus. Gray Physics-Technical Sciences*. (3), 19–29 (in Russian).

Received: 17 October 2025

Accepted: 28 November 2025

Вклад авторов

Гладинов А. Д. разработал метод изготовления экранов электромагнитного излучения на основе токопроводящих и магнитных покрытий, провел измерения коэффициентов отражения и передачи экранов и выполнил сравнительный анализ их частотных зависимостей в СВЧ-диапазоне.

Бойправ О. В. оказала помощь в интерпретации результатов измерений и написании статьи.

Богуш В. А. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, а также принимал участие в интерпретации результатов.

Authors' contribution

Gladinov A. D. has developed a method for manufacturing electromagnetic radiation shields based on conductive and magnetic coatings, measured the shields' reflection and transmission coefficients, and performed a comparative analysis of their frequency dependences in the microwave range.

Boiprav O. V. has assisted in interpreting the measurement results and writing the article.

Bogush V. A. has defined the tasks that needed to be addressed during the research and participated in interpreting the results.

Сведения об авторах

Гладинов А. Д., асп. каф. защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

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

Богуш В. А., д-р физ.-мат. наук, проф., ректор БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-89-38
E-mail: a.gladinov@bsuir.by
Гладинов Антон Дмитриевич

Information about the authors

Gladinov A. D., Postgraduate at Information Protection Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Boiprav O. V., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of Information Protection Department, BSUIR

Bogush V. A., Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Rector of the BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-89-38
E-mail: a.gladinov@bsuir.by
Gladinov Anton Dmitrievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-65-70>

УДК 004.021:004.056.55

ВЫБОР АЛГОРИТМОВ ПОСТКВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ ДЛЯ СТАНДАРТИЗАЦИИ И ОЦЕНКИ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ

С. Ю. МИХНЕВИЧ^{1,2}, П. И. ГЛАДУН¹

¹Белорусская государственная академия связи (Минск, Республика Беларусь)

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

Аннотация. Показан процесс выбора алгоритмов постквантовой криптографии для стандартизации на основе параметров, предлагаемых Национальным институтом стандартов и технологий США. Выполнена оценка стойкости алгоритмов постквантовой криптографии к атакам классических и квантовых компьютеров с учетом их особенностей. Обосновано различное количество операций для атак со стороны квантовых и классических компьютеров. Проанализированы возможности распараллеливания алгоритмов постквантовой криптографии. Отмечено, что несмотря на предполагаемое использование квантовых компьютеров, основная задача криптографии – применение алгоритмов, построенных на задачах, не сводимых к задачам P-типа сложности.

Ключевые слова: алгоритмы постквантовой криптографии, стандартизация, параметры безопасности криптографических алгоритмов, глубина схемы, распараллеливание.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Михневич, С. Ю. Выбор алгоритмов постквантовой криптографии для стандартизации и оценки их безопасности / С. Ю. Михневич, П. И. Гладун // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 65–70.
<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-65-70>.

SELECTION OF POST-QUANTUM CRYPTOGRAPHY ALGORITHMS FOR STANDARDIZATION AND ASSESSMENT OF THEIR SECURITY

SVETLANA YU. MIKHNEVICH^{1,2}, PAVEL I. HLADUN¹

¹Belarusian State Academy of Communications (Minsk, Republic of Belarus),

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

Abstract. The process of selecting post-quantum cryptography algorithms for standardization based on parameters proposed by the National Institute of Standards and Technology (NIST) is described. The resistance of post-quantum cryptography algorithms to attacks by classical and quantum computers is assessed, taking into account their specific features. The different numbers of operations for attacks by quantum and classical computers are substantiated. The parallelization potential of post-quantum cryptography algorithms is analyzed. It is noted that, despite the proposed use of quantum computers, the primary goal of cryptography is the application of algorithms based on problems that are not reducible to problems of P-class complexity.

Keywords: post-quantum cryptography algorithms, standardization, cryptographic algorithm security parameters, circuit depth, parallelization.

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

For citation. Mikhnevich S. Yu., Hladun P. I. (2025) Selection of Post-Quantum Cryptography Algorithms for Standardization and Assessment of Their Security. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 65–70. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-65-70> (in Russian).

Введение

Неотъемлемая часть информатизации – защита персональных данных и другой служебной информации при их пересылке. Для этого наравне с защищенными каналами связи используются криптографические методы. Криптография основана на математически сложных задачах, решение которых требует временных и материальных ресурсов. Благодаря квантовым вычислительным алгоритмам можно значительно сократить время, необходимое для решения задач такого вида [1, 2]. Некоторые глобальные компании уже переходят к использованию алгоритмов постквантового шифрования [3].

Вместе с тем остается много вопросов, связанных с постквантовыми алгоритмами шифрования. Например, на чем основывается выбор алгоритма постквантовой криптографии и длины ключа для конкретной задачи? Какие параметры описывают стойкость постквантовых алгоритмов и их допустимые значения? Можно ли сделать настоящие криптографические схемы совместимыми с постквантовыми? Какие параметры в постквантовых алгоритмах можно стандартизировать [2]? Для ответа на эти вопросы Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) в 2016 г. начал процесс стандартизации алгоритмов постквантовой криптографии (PQC). Оценка происходила в четыре этапа, на которых изучались все предложенные алгоритмы (82) по следующим критериям в порядке значимости: безопасность, стоимость и производительность, практичность¹²³⁴.

Выбор алгоритмов постквантовой криптографии для стандартизации

Следует отметить, что абсолютно стойкие криптографические шифры очень дорогие и не практичны в использовании [4]. Поэтому NIST оценивал соотношение стойкости криптографического алгоритма и его практичности.

Для оценки безопасности в NIST определили пять уровней криптографической стойкости⁵, а также изучили устойчивость к атакам по сторонним каналам, к многоключевым атакам и несанкционированному использованию. На последних этапах стойкость алгоритма проверялась на неразличимость при атаке с помощью выбранного шифротекста (IND-CCA).

При оценке стоимости и производительности изучались:

- размеры открытых ключей, шифр текста и подписей;
- эффективность вычислений при генерации ключей, а также операций с открытыми и закрытыми ключами;
- вероятность ошибок дешифрования.

Практичность оценивалась преимущественно алгоритмами, способными эффективно работать на большем количестве платформ, расширять набор команд для достижения лучшей производительности с учетом гибкости, простоты и легкости внедрения. На последних этапах важной характеристикой представленных алгоритмов было их потенциальное влияние на производительность существующих широко используемых протоколов (например, TLS, IPsec, SSH) и сертификатов. Кроме того, учитывался один из важных оценочных факторов – может ли патент помешать принятию криптографического стандарта. Заключительные отчеты по этапам оценки были опубликованы в 2019, 2020, 2022 и 2025 гг. На третьем (предпоследнем) этапе стандартизации остались:

- алгоритмы шифрования с открытым ключом, механизм инкапсуляции ключей (PKE/KEM): Classic McEliece, CRYSTALS-Kyber, NTRU, Saber;
- схемы цифровой подписи: CRYSTALS-Dilithium, Falcon, Rainbow.

¹ Status Report on the First Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process: NISTIR 8240. 2019. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8240>.

² Status Report on the Second Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process: NISTIR 8309. 2020. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8309>.

³ Status Report on the Third Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process: NISTIR 8413. 2022. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8413>.

⁴ Status Report on the Fourth Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process: NISTIR 8545. 2025. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8545>.

⁵ Submission Requirements and Evaluation Criteria for the Post-Quantum Cryptography Standardization Process. Mode of access: <https://csrc.nist.gov/csrc/media/projects/post-quantum-cryptography/documents/call-for-proposals-final-dec-2016.pdf>. Date of access: 22.07.2025.

Альтернативные алгоритмы-кандидаты включали:

- алгоритмы PKE/KEM: BIKE, FrodoKEM, HQC, NTRU Prime, SIKE;
- схемы цифровой подписи: GeMSS, Picnic, SPHINCS+.

Проведя оценку этапов, NIST выбрал четыре алгоритма для стандартизации сразу после третьего раунда – алгоритм PKE/KEM CRYSTALS-Kyber и цифровые подписи CRYSTALS-Dilithium, Falcon, SPHINCS+.

Различные криптографические алгоритмы применяются для разных целей. Например, в настоящее время алгоритмы симметричного шифрования AES, DES, 3DES и другие используются для шифрования/дешифрования большого объема информации (работают в основном быстрее асимметричных алгоритмов, но требуют безопасного обмена ключами). Алгоритмы асимметричного шифрования RSA, DSA, Diffie-Hellman, ECC и т. п. решают проблему обмена ключами. Для шифрования при передаче информации используются RSA, AES, DES, для цифровой подписи – DSA, ECDSA, RSA. Цель алгоритмов цифровой подписи – аутентификация отправителя и проверка целостности сообщения, т. е. подтверждение, что сообщение не было изменено после подписи. В качестве алгоритма формирования ключа используется в основном Diffie-Hellman.

В PQC сформированы следующие основные направления разработки криптографических алгоритмов:

- криптография на основе решеток (Lattice-based cryptography);
- криптография на основе хеш-функций (Hash-based cryptography);
- криптография на изогениях суперсингулярных эллиптических кривых (Isogeny based cryptography);
- многомерная криптография, в которой используются системы многомерных полиномиальных уравнений (Multivariate cryptography);
- криптография на основе кодов (Code-based cryptography)¹⁻⁴.

Пропорциональный объем публикаций за последние пять лет по данным направлениям и алгоритмам, выделенным NIST, приведен на диаграмме Венна на рис. 1. Диаграмма описывает области исследований PQC [1].

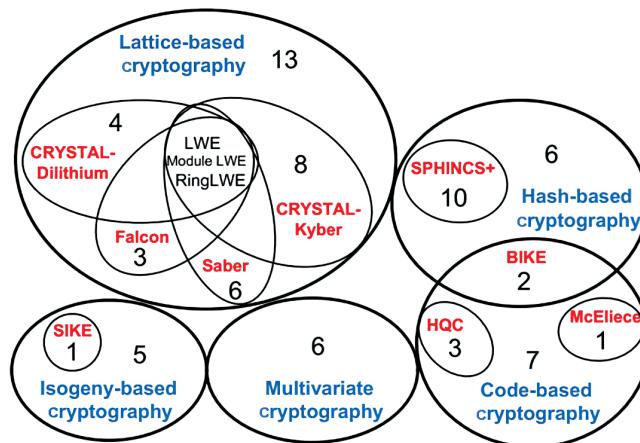


Рис. 1. Диаграмма Венна, отображающая пропорциональный объем публикаций за последние пять лет по алгоритмам

Fig. 1. A Venn diagram showing the proportional volume of publications over the past five years by algorithm

В 2024 г. NIST выпустил серию стандартов для федерального использования:

- FIPS 203 – стандарт механизма инкапсуляции ключей на основе модульной решетки, основан на алгоритме CRYSTALS-Kyber⁶;
- FIPS 204 – стандарт цифровой подписи на основе модульной решетки, основан на алгоритме CRYSTALS-Dilithium⁷;

⁶ Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard: Federal Information Processing Standards Publication 203, 2024. <https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.203.ipd>.

⁷ Module-Lattice-Based Digital Signature Standard: Federal Information Processing Standards Publication 204, 2024. <https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.204>.

– FIPS 205 – стандарт цифровой подписи на основе хеша без сохранения состояния, основан на алгоритме SPHINCS+⁸.

Эти стандарты обязательны для применения к информационным системам, используемым или эксплуатируемым федеральными агентствами и их подрядчиками, но они не применяются к системам национальной безопасности США. В настоящее время Международная организация по стандартизации (ISO) рассматривает алгоритм Classic McEliece (основан на использовании двоичных кодов Гоппы) для стандартизации.

В последнем отчете 2025 г. NIST сравнивал КЕМ-алгоритмы на основе кодов BIKE, HQC, Classic McEliece и алгоритм на основе изогений суперсингулярных эллиптических кривых SIKE. В результате для стандартизации выбран алгоритм HQC (квазициклический алгоритм Хэмминга)⁴.

Оценка криптографической стойкости алгоритмов постквантовой криптографии

Следует отметить, что стандартизация алгоритмов РQC должна учитывать атаки классических и квантовых компьютеров или их совместное использование. Вместе с тем тестирование стойкости алгоритмов к атакам проводилось с применением классических компьютеров. NIST признает неопределенность в оценке уровней безопасности алгоритмов РQC при использовании квантовых компьютеров, которые в настоящее время еще развиваются, и их итоговые характеристики не известны. Кроме того, еще не разработаны основные алгоритмы для квантовых компьютеров. Для оценки защищенности алгоритмов от атак с помощью квантовых компьютеров приняты следующие подходы.

В [5] на основе применения алгоритма Гровера для взлома стандартизованных FIPS-алгоритмов AES-*k* (AES – симметричный алгоритм блочного шифрования; *k* составляет 128, 192 и 256 бит) при оценке ресурсов квантового компьютера предложено использовать три параметра: количество вентилей (гейтов), глубину схемы (количество последовательных слоев квантовых вентилей) и количество кубитов. Для временной оценки реализации алгоритма достаточно использовать только глубину схемы.

NIST определил отдельную категорию для каждого из требований безопасности, которые перечислены в порядке возрастания силы.

1. Любая атака, нарушающая соответствующее определение безопасности, должна требовать вычислительных ресурсов, сопоставимых или превышающих те, которые нужны для поиска ключа в блочном шифре со 128-битным ключом (например, AES-128).

2. Любая атака, нарушающая соответствующее определение безопасности, должна требовать вычислительных ресурсов, сопоставимых или превышающих те, которые нужны для поиска коллизий в 256-битной хеш-функции (например, SHA-256/SHA3-256) (SHA – алгоритм хеширования).

3. Любая атака, нарушающая соответствующее определение безопасности, должна требовать вычислительных ресурсов, сопоставимых или превышающих те, которые нужны для поиска ключа в блочном шифре со 192-битным ключом (например, AES-192).

4. Любая атака, нарушающая соответствующее определение безопасности, должна требовать вычислительных ресурсов, сопоставимых или превышающих те, которые нужны для поиска коллизий в 384-битной хеш-функции (например, SHA-384/SHA3-384).

5. Любая атака, нарушающая соответствующее определение безопасности, должна требовать вычислительных ресурсов, сопоставимых или превышающих те, которые нужны для поиска ключа в блочном шифре с 256-битным ключом (например, AES-256)⁵.

Для оценки длительности вычислений применяются алгоритмы AES и SHA потому, что время их взлома путем перебора на квантовом компьютере может быть ускорено по сравнению с классическим компьютером всего лишь в корень квадратный для AES и корень кубический для SHA. Следует отметить, что алгоритм Шора тоже эффективно решает задачи факторизации целых чисел и дискретного логарифмирования за полиномиальное время на квантовом компьютере. Алгоритм AES-256 считается в некотором приближении устойчивым к атакам квантового компьютера [2]. В табл. 1 приведены уровни сложности криптографических алгоритмов.

⁸ Stateless Hash-Based Digital Signature Standard: Federal Information Processing Standards Publication 205, 2024. <https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.205>.

Таблица 1. Уровни сложности криптографических алгоритмов⁵
Table 1. Complexity levels of cryptographic algorithms⁵

Алгоритм	Уровень сложности
AES-128	$2^{170}/\text{MAXDEPTH}^*$ квантовых вентилей или 2^{143} классических операций
SHA3-256	2^{146} классических операций
AES-192	$2^{233}/\text{MAXDEPTH}$ квантовых вентилей или 2^{207} классических операций
SHA3-384	2^{210} классических операций
AES-256	$2^{298}/\text{MAXDEPTH}$ квантовых вентилей или 2^{272} классических операций
SHA3-512	2^{274} классических операций

*MAXDEPTH – глубинная схема.

В качестве параметра времени выполнения NIST предлагает использовать подход, при котором квантовые атаки ограничиваются фиксированным временем выполнения или MAXDEPTH. Возможные значения MAXDEPTH варьируются от 2^{40} логических вентилей (приблизительное количество вентилей, которое, как ожидается, современные архитектуры квантовых вычислений смогут последовательно выполнить за год) до 2^{64} логических вентилей (приблизительное количество вентилей, которое современные архитектуры классических вычислений могут последовательно выполнить за десятилетие), и до не более 2^{96} логических вентилей (приблизительное количество вентилей, которое кубиты атомного масштаба со скоростью распространения света могли бы выполнить за тысячелетие)⁵.

Тот факт, что количество вентилей для квантового компьютера больше, чем для классического, объясняется разными алгоритмами. Даже базовые логические операции на квантовом и классическом компьютерах отличаются, поэтому будут отличаться и алгоритмы, реализующие аналогичные вычисления. Но квантовые вычисления могут быть значительно ускорены благодаря возможности параллельного анализа большого пространства решений. В общем, весь криптоанализ основан на сложной с точки зрения математики задаче, что позволяет в методе перебора при увеличении длины ключа говорить об экспоненциальной ($O(2^n)$) или почти экспоненциальной сложности, если, конечно, математическая задача не может быть сведена к алгоритму полиномиальной сложности на детерминированной машине Тьюринга.

Распараллеливание алгоритмов постквантовой криптографии может в принципе ускорить процесс криптоанализа. Многие алгоритмы постквантовой криптографии используют как минимум операцию умножения матриц, которую можно эффективно распараллелить на нескольких процессорах. Так, криптография на основе кода может быть распараллелена, поскольку шифрование сообщения состоит просто в применении соответствующего корректирующего кода, т. е. в выполнении векторного матричного произведения. В методе криптографии на основе решеток также используются матрицы. В качестве примера можно привести следующее: выбираются два секретных полинома d, e с небольшими коэффициентами ($-1, 0, 1$) и вычисляется $c = hd + e(\text{mod } x^p - 1) \text{mod } q$ (c – зашифрованный текст; h – открытый ключ; x – сообщение; p, q – параметры криптографического алгоритма). Здесь применяется матричное произведение полиномов h и d , поскольку в виде матриц полиномы умножаются гораздо быстрее. Метод криптографии на основе сигнатур многомерных квадратных уравнений содержит аффинные преобразования многочленов, что также можно представить в матричном виде.

Однако ускорение за счет возможного распараллеливания алгоритма шифрования для ускорения метода перебора в сети классических компьютеров не даст большого эффекта из-за большого пространства решений (2^n). А перевод напрямую классических алгоритмов на квантовый компьютер и использование его возможностей для параллельного анализа большого пространства решений невозможны вследствие разных логик классического и квантового компьютеров. Таким образом, несмотря на создание квантовых компьютеров, основная задача криптоанализа заключается в разработке алгоритма, уменьшающего пространство решений для конкретных алгоритмов шифрования, а задача криптографии – использование алгоритмов, которые не могут быть сведены к задачам Р-типа, т. е. алгоритмам полиномиальной сложности на детерминированной машине Тьюринга.

Выходы

Рассмотрены процесс выбора алгоритмов постквантовой криптографии для стандартизации и параметры их отбора. Приведен параметр оценки стойкости постквантовых алгоритмов к атакам с использованием классических и квантовых компьютеров. Проанализирована возможность распараллеливания алгоритмов постквантовой криптографии. Показано, что это неэффективно для атак со стороны как квантовых, так и классических компьютеров. Обосновано, что основной задачей криптографии остается использование алгоритмов, не сводимых к задачам P-типа.

Список литературы / References

1. Duc-Thuan Dam, Thai-Ha Tran, Van-Phuc Hoang (2023) A Survey of Post-Quantum Cryptography: Start of a New Race. *Cryptography*. (7). <https://doi.org/10.3390/ryptography7030040>.
2. Niederhagen R., Waidner M. (2017) *Practical Post-Quantum Cryptography*. Darmstadt, Fraunhofer Institute for Secure Information Technology.
3. Google Announces New Algorithm That Makes FIDO Encryption Safe From Quantum Computers. *Ars Technica*. Available: <https://arstechnica.com/security/2023/08/passkeys-are-great-but-not-safe-from-quantum-computers-dilithium-could-change-that/> (Accessed 20 March 2025).
4. Yashchenko V. V. (1998) Basic Concepts of Cryptography. *Mathematical Education*. 3 (2), 53–70 (in Russian).
5. Grassl M., Langenberg B., Roetteler M., Steinwandt R. (2025) Applying Grover’s Algorithm to AES: Quantum Resource Estimates. *arXiv:1512.04965v1*. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.04965> (Accessed 20 March 2025).

Поступила 19.09.2025

Принята в печать 09.10.2025

Received: 19 September 2025

Accepted: 9 October 2025

Вклад авторов

Михневич С. Ю. провела анализ стандартизации алгоритмов постквантовой криптографии.

Гладун П. И. принимал участие в рассмотрении вопросов, связанных с криптографической стойкостью алгоритмов постквантовой криптографии.

Authors' contribution

Mikhnevich S. Yu. conducted the standardization analysis of post-quantum cryptography algorithms.

Gladun P. I. took part in the consideration of issues related to the cryptographic stability of post-quantum cryptography algorithms.

Сведения об авторах

Михневич С. Ю., канд. физ.-мат. наук, доц., зав. каф. инфокоммуникационных технологий, Белорусская государственная академия связи; доц. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Гладун П. И., преп. каф. инфокоммуникационных технологий, Белорусская государственная академия связи

Адрес для корреспонденции

220076, Республика Беларусь,
Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2
Белорусская государственная академия связи
Тел.: +375 44 701-15-67
E-mail: s.mikhnevich@bsac.by
Михневич Светлана Юрьевна

Information about the authors

Mikhnevich S. Yu., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Head of the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State Academy of Communications; Associate Professor at the Department of Information Radiotchnologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Hladun P. I., Lecturer at the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State Academy of Communications

Address for correspondence

220076, Republic of Belarus,
Minsk, F. Skoryna St., 8/2
Belarusian State Academy of Communications
Tel.: +375 44 701-15-67
E-mail: s.mikhnevich@bsac.by
Mikhnevich Svetlana Yurievna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-71-79>

УДК 621.382

ОБНАРУЖЕНИЕ АППАРАТНЫХ ТРОЯНОВ В УСТРОЙСТВАХ КРИПТОГРАФИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А. Ю. ВОРОНОВ, В. Р. СТЕМПИЦКИЙ

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

Аннотация. Современная гонка технологий, направленная на увеличение объемов получаемой, обрабатываемой и передаваемой информации, играет важную роль в безопасности любых стран, так как эти направления являются основными для разворачивания сложных языковых и экспериментальных моделей, или моделей переднего края (frontier), которые применяются в цифровых экосистемах и военном деле. Особенно это касается средств связи и стойкости их криптографического шифрования. Компрометация передаваемой информации, скрытая от официальных абонентов закрытой радиосети, способна нанести гораздо больший вред по сравнению с ее отказом. Учитывая большую скорость изменений и ввода новинок, страны, не имеющие собственных производственных мощностей, вынуждены изготавливать цифровые модули шифрования на территории других государств, что связано с рисками внедрения аппаратных закладок. В статье описаны результаты программного тестирования нейросети, способной обнаруживать компрометацию информации в модуле шифрования AES-256 (Advanced Encryption Standard) на основе анализа получаемой и передаваемой им информации без наличия «золотого образца».

Ключевые слова: цифровая электроника, аппаратная безопасность, аппаратные трояны, криптография, AES, машинное обучение, нейросети, функционально-логическое тестирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Воронов, А. Ю. Обнаружение аппаратных троянов в устройствах криптографии с использованием машинного обучения / А. Ю. Воронов, В. Р. Степпицкий // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 71–79. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-71-79>.

DETECTING HARDWARE TROJANS IN CRYPTOGRAPHY DEVICES USING MACHINE LEARNING

ALEKSEY YU. VORONOV, VICTOR R. STEMPITSKY

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

Abstract. The current technological race to increase the volume of received, processed, and transmitted information plays a crucial role in the security of any country, as these areas are fundamental for the deployment of complex linguistic and experimental models, or frontier models, used in digital ecosystems and military affairs. This is particularly true for communications equipment and the strength of their cryptographic encryption. Compromising transmitted information, hidden from official subscribers of a closed radio network, can cause far greater damage than its failure. Given the rapid pace of change and innovation, countries without their own manufacturing capabilities are forced to manufacture digital encryption modules in other countries, which carries the risk of introducing hardware Trojans. This article describes the results of software testing of a neural network capable of detecting information compromise in an AES-256 (Advanced Encryption Standard) encryption module based on the analysis of received and transmitted information without a “golden reference”.

Keywords: digital electronics, hardware security, hardware Trojans, cryptography, AES, machine learning, neural networks, functional testing.

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

For citation. Voronov A. Yu., Stempitsky V. R. (2025) Detecting Hardware Trojans in Cryptography Devices Using Machine Learning. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 71–79. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-71-79> (in Russian).

Введение

В настоящее время рост количества абонентов в цифровой сети и объемов передаваемой информации между ними является одним из обязательных условий развития коммерческих и государственных экосистем. Внедрение концепции интернета вещей во все цифровые устройства требует создания новых, более функциональных устройств, способных принимать, обрабатывать и передавать большие объемы данных. Подобно программному обеспечению, аппаратное обеспечение также уязвимо к внедрению вредоносных схемотехнических решений, называемых аппаратными троянами или аппаратными закладками, которые могут представлять опасность в области конфиденциальности передаваемой информации и функционирования всей цифровой экосистемы в целом.

Внедрить троян можно на любом этапе: от проектирования спецификаций до тестирования и корпусирования микросхемы. Методы обнаружения таких закладок делятся на две группы: деструктивные (с разрушением микросхемы) и неразрушающие. Первый, традиционный, метод предполагает послойное изучение топологии чипа с помощью микроскопии. Он точен, но требует много времени, значительных затрат и специально оборудованной лаборатории. Неинвазивные методы, такие как анализ побочных каналов (side-channel analysis, SCA) и логическое тестирование, более предпочтительны благодаря меньшей стоимости и возможности выявлять угрозы на этапе разработки в ходе проверки инженерных образцов. Анализ побочных каналов отслеживает изменения в энергопотреблении, температуре, временных задержках и площасти кристалла. Абсолютное большинство неинвазивных методов имеют один общий недостаток – необходимость наличия «золотого образца» для сравнения результатов.

За последние пять лет методы машинного обучения и применение нейронных сетей качественно изменили подход к обнаружению аппаратных троянов, совершив переход от трудоемких и часто неэффективных ручных методов, включая написание скриптов, к автоматизированному, высокоточному и масштабируемому анализу. Аппаратные трояны спроектированы так, чтобы быть незаметными при функциональном тестировании. Они могут активироваться только при определенной комбинации сигналов или при нестандартных физических условиях, таких как температура или питающее напряжение. Методы машинного обучения превосходят классические методики в нахождении сложных, нелинейных зависимостей в данных.

Начиная с 2010 г., машинное обучение стало рассматриваться как один из способов обнаружения троянов, что отражено в [1]. В период бурного развития моделей нейросетей и скоростей их обучения на специализированных ядрах графических ускорителей, начиная с 2015-го и по настоящее время, в 2020-м в [2] было обозначено направление, как теоретически нейросети могут быть применены для обнаружения аппаратных закладок. Уже в 2022 г. в [3] было показано, как, не имея «золотого образца», при использовании методов машинного обучения определить наличие встроенного аппаратного трояна: при анализе проекта на уровне вентиляй строились графы, где логические вентили представлялись узлами, а соединения между ними – соединениями между вентилями. Нейросеть определяла нарушения шаблонов взаимосвязей в структурах полученных графов и с высокой степенью точности определяла наличие аппаратной закладки.

Эффективность рассматриваемого направления особенно проявляется в методах, основанных на анализе по стороннему каналу. Так, описанная в [4] нейросеть, смогла с высокой точностью определить внедренный троян, анализируя электромагнитный спектр микросхемы на основе эталонного профиля «золотого образца».

Цель проводимого исследования – определение эффективности способа обнаружения внедренных троянов в интегральных микросхемах, реализующих алгоритмы криптографического шифрования, с помощью методов машинного обучения. Для этого на базе программного комплекса Xilinx Vivado версии 2024.2 разработан блок шифрования AES-256, в который внедрены аппаратные закладки с разными механизмами активации, каждый из которых реализует подмену шифрования, утечку ключа шифрования или отправку незашифрованной посылки. С помощью языка программирования Python и программной платформы PyTorch разработана

модель для машинного обучения, которая сможет анализировать значения на входах и выходах модуля шифрования и определять корректность их функционирования. На основании значений, выдаваемых натренированной нейросетью, будет определяться наличие в исследуемом модуле аппаратного трояна.

Исследуемое устройство и анализируемые параметры

В качестве исследуемого устройства был выбран модуль шифрования AES-256, в который внедрялись аппаратные закладки с несколькими механизмами активации. Их цель – внесение одинаковых функциональных изменений в работе цифрового устройства: подмена ключа шифрования на нули или единицы; отправка незашифрованного ключа шифрования вместо зашифрованных данных; отправка незашифрованной посылки. Тестовое окружение представляет собой драйвер, который отправляет в модуль AES-256, описанный на VHDL, данные для шифрования величиной 128 бит и ключ шифрования длиной 256 бит. Значения на выходе блока шифрования анализируются монитором, сравнивающим их со значениями, полученными при помощи библиотеки `cryptography 47.0.0` языка программирования Python. Нейросеть под обучением анализирует незашифрованную и зашифрованную посылки, а также ключ шифрования, и на основании расхождения в шаблонах делает вывод о наличии или отсутствии режимов работы, не описанных в документации. Схема тестового окружения приведена на рис. 1. Такой подход теоретически позволит быстро определить некорректную работу алгоритма шифрования и предпринять необходимые меры.

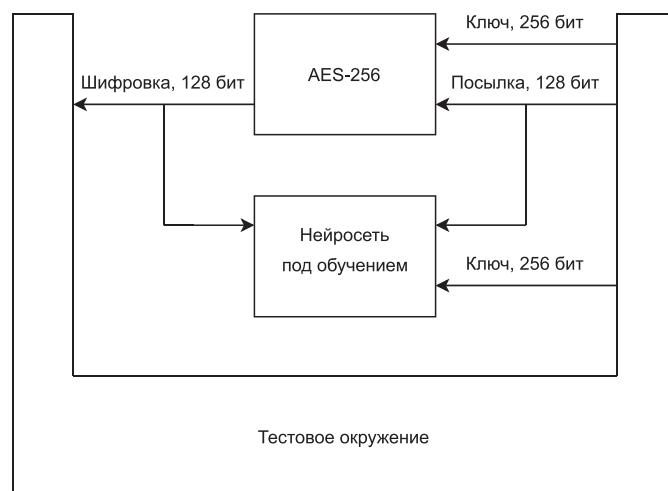


Рис. 1. Схема тестового окружения
Fig. 1. Testbench diagram

Первый внедренный троян имеет внутренний механизм активации и представляет собой 32-битный счетчик, который активируется спустя несколько минут после включения устройства. Этот тип троянов самый простой в реализации и в данной статье представлен, как тактируемый напрямую от генератора 50 МГц. Упрощенное схематичное изображение устройства с трояном-счетчиком, который при активации подменяет ключ шифрования на нули, приведено на рис. 2.

Вторая аппаратная закладка также имеет внутренний механизм активации с той разницей, что счетчик тактируется не от основного тактового сигнала, а от простой комбинационной схемы, которая представляет собой несколько управляющих или передающих сигналов, подключенных через логический элемент (рис. 3). Такой прием при сохранении размеров [5] троянов и их энергопотребления [6] позволяет значительно увеличить срок работы устройства перед заложенной активацией. В исследовании в качестве комбинационной схемы был принят логический элемент «исключающее ИЛИ» (XOR) [7], которому на вход поступали старший и младшие биты незашифрованной посылки. Данный аппаратный троян при активации вносит функциональное изменение в виде замены 256-битного ключа шифрования на нули.

Следующая аппаратная закладка имеет внешний механизм активации и приводится в действие после получения определенной последовательности данных. Такие аппаратные закладки являются самыми распространенными и представляют собой обычный автомат конечных состояний.

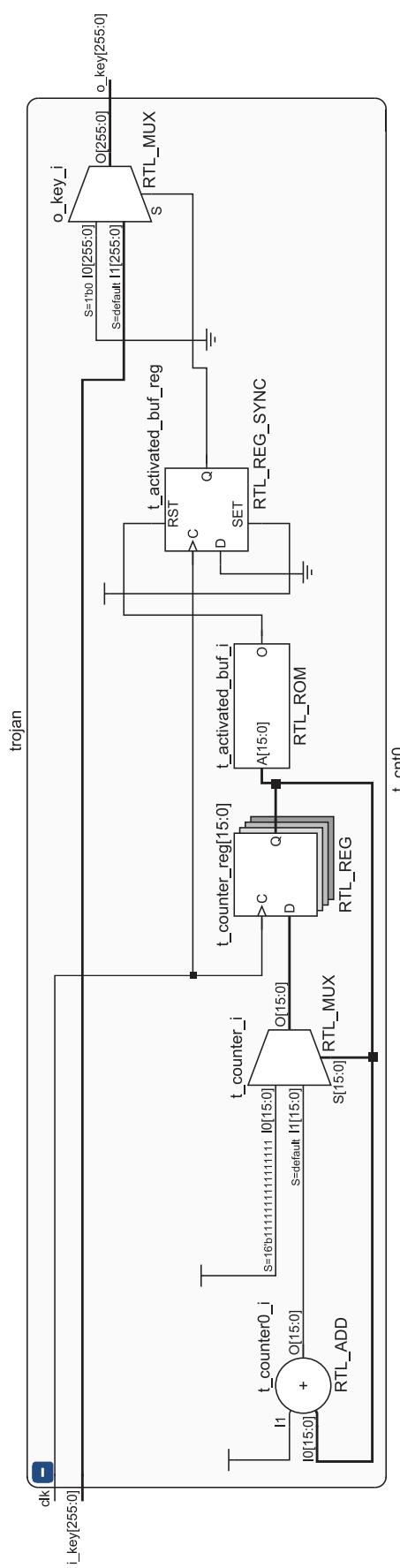


Рис. 2. Схематичное изображение трояна-счетчика
Fig. 2. Schematic of Trojan-counter

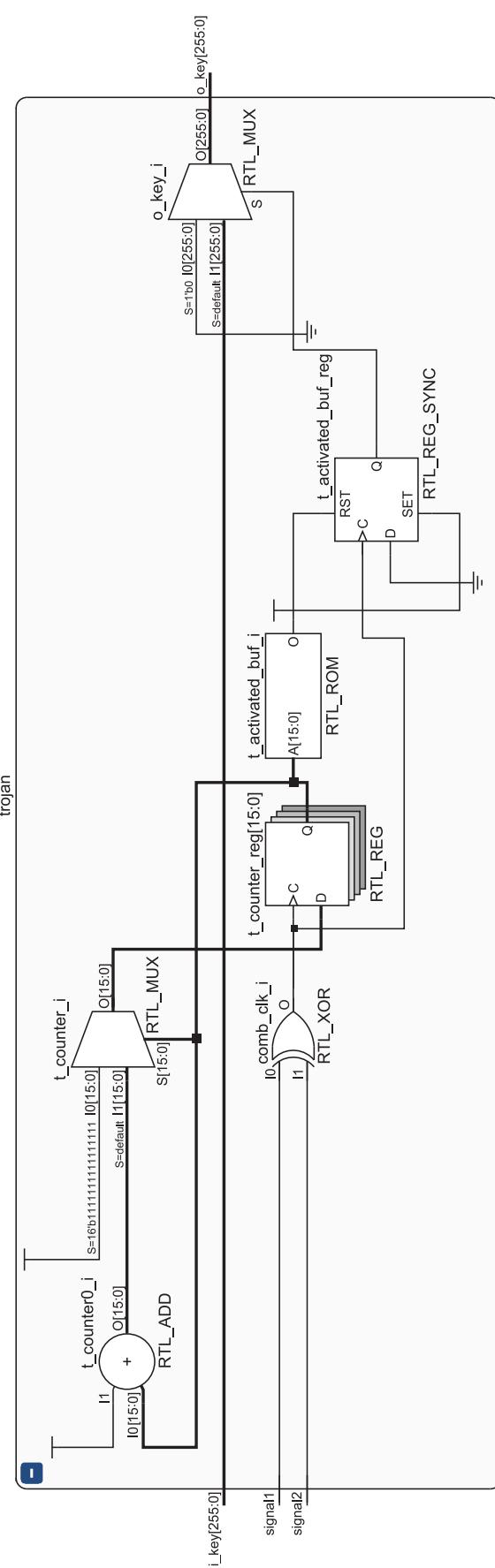


Рис. 3. Схематичное изображение комбинационного трояна-счетчика
Fig. 3. Schematic of combinational Trojan-counter

После получения всей последовательности данных троян переходит в замкнутое состояние конечного автомата (deadlock), при котором активируется скрытый функционал. В данной реализации у трояна отсутствует энергонезависимая память для хранения последнего состояния конечного автомата, и отключение устройства от питающего напряжения сбросит автомат в начальное состояние [8]. Для активации трояна ему необходимо получить значения «15», «1F» и «AF» в шестнадцатеричном формате в старших байтах незашифрованных посылок. При активации аппаратная закладка подменит ключ шифрования на нули. Схематичное изображение трояна показано на рис. 4.

Каждый из механизмов активации троянов также будет выполнять операции подмены ключа шифрования на единицы, отправки незашифрованного ключа вместо зашифрованной посылки или отправки незашифрованной посылки. Их схематичные изображения не приведены ввиду малой целесообразности, поскольку в них будут изменены лишь входные линии, за исключением тех троянов, где осуществляется отправка ключа шифрования. В этих троянах отправка ключа происходит за два цикла шифрования, потому что ключ составляет 256 бит, а посылка – 128 бит. Также сама отправка ключа повторяется 10 раз при каждой смене ключа шифрования после активации трояна.

При помощи библиотеки `cryptography 47.0.0` Python сформирован набор тестовых векторов из 12 миллионов значений, которые включали в себя значения как нормальной работы устройства, так и значения, соответствующие выходным параметрам рассматриваемого блока шифрования при активированной аппаратной закладке.

Основная проблема рассматриваемого подхода, а именно – обычный анализ данных на входах и выходах цифрового блока, заключается в том, что считается невозможным сколько-нибудь точное предсказание нейросетью результатов шифрования, особенно побитового. Начальный подход в исследовании базировался на обучении нейронной сети без учителя, как это было проделано в [3], используя технику автоэнкодера. Автоэнкодер является базовой техникой машинного обучения и позволяет модели самостоятельно понять, как лучше представить оригинальные значения в более сжатой форме. Ожидалось, что данный формат позволит нейросети находить аномалии при анализе входов и выхода блока AES-256 при активированном трояне. Для проверки этой теории с использованием набора тестовых векторов модель обучалась десять тысяч эпох, где в каждой эпохе вероятность подстановки неверного значения зашифрованного текста изменялась от 5 до 15 %. По итогу обучения логарифм потерь (log loss) составил 0,693, что соответствовало модели, которая с вероятностью 50 % отличает два класса (в рассматриваемом случае – нормальная работа и аномалия). Применение данного подхода не позволило обучить модель: даже после длительной тренировки она продолжала выдавать значения случайным образом.

На основании результатов применения техники автоэнкодера было решено изменить подход к рассматриваемым наборам данных. Учитывая, что шифрование AES-256 подразумевает побитовые операции при расширении ключа шифрования и шифровании самой посылки, это не позволяет применить классический подход для обнаружения некорректной работы цифрового блока. Было принято решение применить подход, используемый для обучения классификации изображений. В этом методе нейросеть при своей работе получает 128-битное значение незашифрованной посылки, 128-битное – зашифрованной посылки и 256-битное значение ключа шифрования, а на выходе выдает значение, к какому классу принадлежит данный набор бит: нормальная работа, подмена ключа шифрования, утечка ключа шифрования, отправка незашифрованной посылки. Ожидалось, что новый подход полностью копирует задачу побитовой классификации изображений, для чего нейросети сейчас активно и успешно применяются. Машинное обучение проводилось на тех же векторах значений на протяжении 50 эпох. По итогу обучения нормальная работа предсказывается правильно в 81 % случаев (F1-score: 0,88), подмена ключа шифрования – в 99 % (F1-score: 0,99), утечка ключа шифрования – в 99 % (F1-score: 0,86), отправка незашифрованной посылки – в 100 % случаев (F1-score: 1,00). Такой результат значительно превосходит первоначальный подход с автоэнкодером для задачи обнаружения аномалий в работе блока шифрования.

Для полученной модели был сформирован новый набор тестовых векторов с другим ядром генерации (seed) случайных чисел. Этот набор включал один миллион значений незашифрованных посылок с одним ключом шифрования на каждую одну тысячу посылок. Данные на выходе (зашифрованные посылки) получались при симуляции работы AES-256 в Xilinx Vivado 2024.2

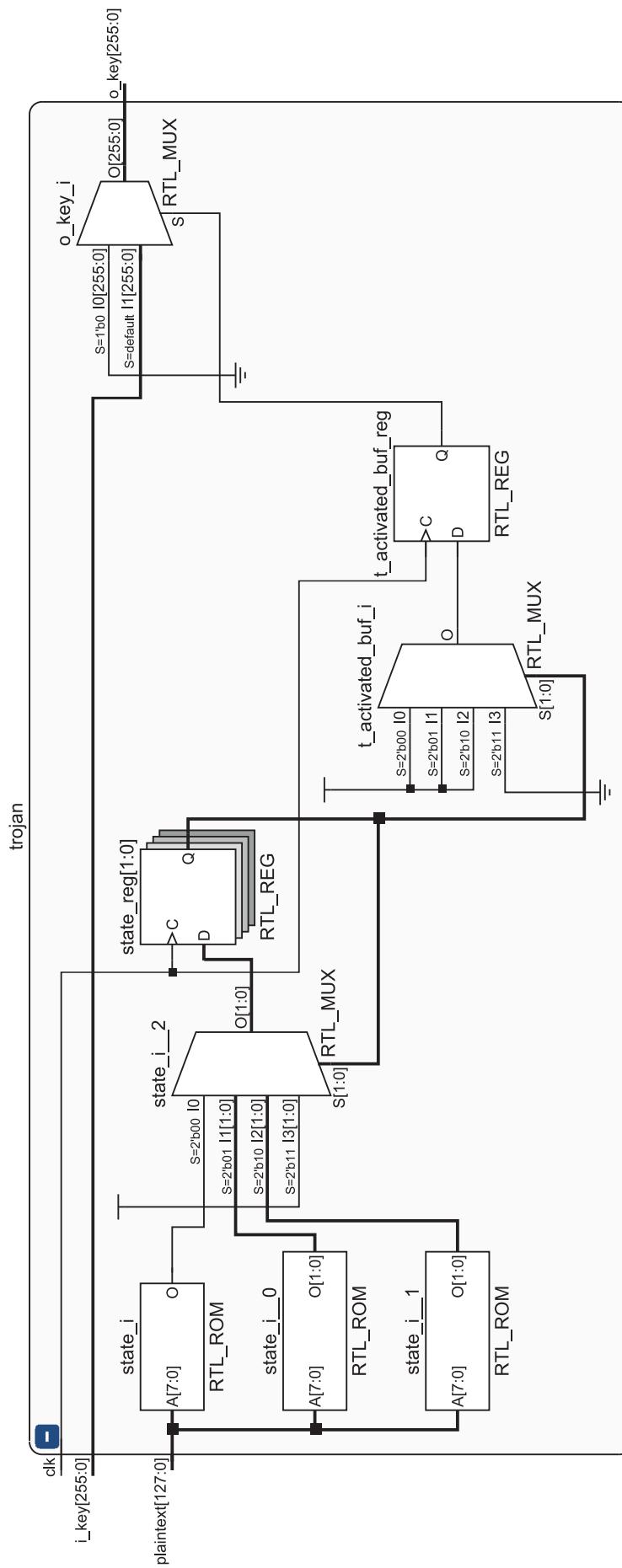


Рис. 4. Схематичное изображение трояна с автоматом конечных состояний
Fig. 4. Schematic representation of a Trojan with a finite state machine

как для нормальной работы, так и для реализаций со встроенным аппаратным трояном для каждого способа его активации и вида функционального изменения.

Результаты исследований и их обсуждение

Полученные значения анализировались обученной нейросетью для каждой реализации модуля шифрования AES-256. Результаты анализа обученной нейросети приведены в табл. 1.

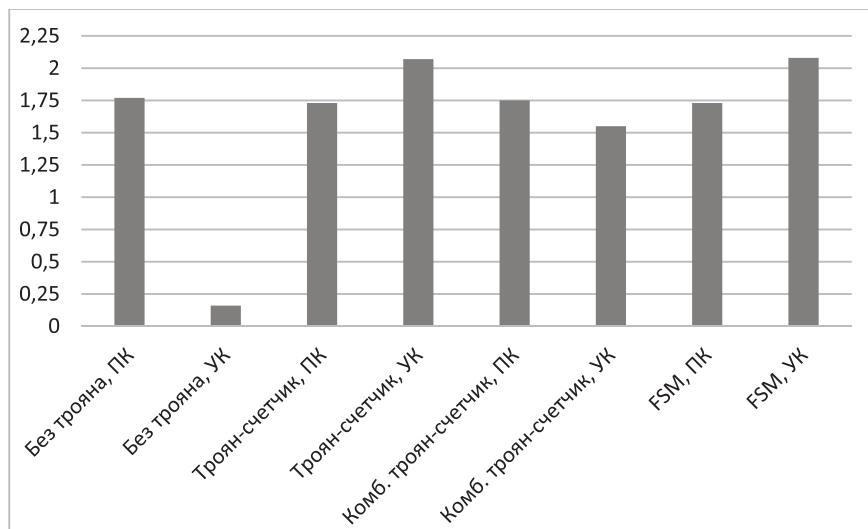
Таблица 1. Результаты анализа обученной нейросети
Table 1. Results of the trained neural network

Анализируемый проект	Нормальная работа, %	Утечка ключа, %	Подмена ключа, %	Незашифрованная посылка, %
Без трояна	98,06	0,16	1,77	0,01
Троян-счетчик, подмена ключа на 0	0,17	0	99,83	0
Троян-счетчик, подмена ключа на 1	0,16	0	99,84	0
Троян-счетчик, незашифрованная посылка	0,16	0	0	99,83
Троян-счетчик, отправка ключа	96,19	2,07	1,73	0,01
Комбинационный троян-счетчик, подмена ключа на 0	0,16	0	99,84	0
Комбинационный троян-счетчик, подмена ключа на 1	26,87	0,05	73,08	0
Комбинационный троян-счетчик, незашифрованная посылка	26,86	0,05	0,55	72,54
Комбинационный троян-счетчик, отправка ключа	96,69	1,55	1,75	0,01
FSM, подмена ключа на 0	0,02	0	99,98	0
FSM, подмена ключа на 1	0,02	0	99,98	0
FSM, незашифрованная посылка	0,02	0	0	99,98
FSM, отправка ключа	96,19	2,08	1,73	0,01

В связи с невысокой плотностью ошибок в самом наборе данных для операции типа «отправка ключа», а также с сопоставимой погрешностью обнаружения операций типа «подмена ключа» классификатором на рис. 5 приведена диаграмма, отображающая долю ошибок для троянов с операциями «подмена ключа» и «утечка ключа» с каждым вариантом активации, а также для AES-256 без аппаратной закладки. Обозначения на рис. 5: УК – утечка ключа; ПК – подмена ключа; Комб. – комбинационный.

На рис. 5 отчетливо видно, что во всех случаях отправки ключа подмены доля обнаружения классификатором наличия операций типа «подмена ключа» – в среднем 1,73, что соответствует такому же значению при работе устройства шифрования без аппаратной закладки. Следует также отметить, что плотность событий отправки ключа составляет в среднем 2 % среди общего числа тестовых векторов для каждого проекта, а именно – 20 тысяч операций отправки ключа шифрования на один миллион операций нормального шифрования.

Полученные результаты позволяют предположить, что при помощи машинного обучения возможно определить подмену ключа шифрования в модулях AES-256 и его разновидностях при использовании более разнообразных комбинаций подмененных ключей, а применение более сложных архитектур нейронных сетей увеличит эффективность предлагаемой методики обнаружения аппаратной закладки. И хотя данный метод не позволяет обнаружить троян на этапе проектирования, с его помощью на этапе эксплуатации можно обнаружить утечку секретной информации в системах передачи данных и сразу перейти на резервные каналы связи. Дешевизна и простота внедрения данной методики проверки обеспечивают возможность ее применения при реализации пользовательских алгоритмов шифрования на интегральных микросхемах специального назначения (ASIC), произведенных на мощностях третьих стран.



УК – утечка ключа, ПК – подмена ключа, Комб. – комбинационный

Рис. 5. Доля ошибок для AES-256 без аппаратной закладки и для троянов при операциях «утечка ключа» и «подмена ключа»

Fig. 5. Error rates for AES-256 without hardware backdoors and for Trojans during “key leakage” and “key substitution” operations

Заключение

1. По итогам исследования можно отметить, что методика, основанная на анализе входных и выходных данных с помощью машинного обучения, позволяет обнаруживать функционирующую аппаратную закладку в криптографических устройствах шифрования в 90 % случаев, в том числе и для событий малой плотности. Нейросеть-классификатор способна распознавать как простые случаи (например, утечку ключа или незашифрованную посылку), так и нормальную работу устройства шифрования и подмену ключа на одинаковые биты с достаточной точностью.

2. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности предлагаемого метода, а также доработать архитектуру нейронной сети с целью добавления возможности обнаружения иных комбинаций подмененного ключа и увеличения ее эффективности для обнаружения и классификации скрытого функционала цифровых блоков со встроенным аппаратным трояном.

Список литературы

1. Tehranipoor, M. A Survey of Hardware Trojan Taxonomy and Detection / M. Tehranipoor, F. Koushanfar // IEEE Design & Test of Computers. 2010. Vol. 27, Iss. 1. P. 10–25. DOI: 10.1109/MDT.2010.
2. Chen, Z. Deep Learning for Cybersecurity: A Review / Z. Chen // 2020 International Conference on Computing and Data Science (CDS), Stanford, CA, USA, 2020. P. 7–18. DOI: 10.1109/CDS49703.2020.00009.
3. Hardware Trojan Detection Using Graph Neural Networks / R. Yasaei [et al.] // IEEE Trans. Comput.-Aided Design Integr. Circuits Syst. 2025. Vol. 44, No 1. P. 25–38.
4. Hardware Trojan Detection Using Unsupervised Deep Learning on Quantum Diamond Microscope Magnetic Field Images / M. Ashok [et al.] // ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems. 2022. Vol. 18, No 4. P. 1–25.
5. Xilinx Power Estimator User Guide (UG440). Santa Clara, California: AMD/ Xilinx, 2023.
6. Vivado Design Suite User Guide (UG901). Santa Clara, California: AMD/ Xilinx, 2020.
7. Тарасов, И. Е. ПЛИС Xilinx. Языки описания аппаратуры VHDL и Verilog, САПР, приемы проектирования / И. Е. Тарасов. М.: Горячая линия – Телеком, 2021.
8. Белоус, А. И. Программные и аппаратные трояны – способы внедрения и методы противодействия. Первая техническая энциклопедия в 2-х книгах / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. М.: Техносфера, 2019.

Поступила 14.10.2025

Принята в печать 25.11.2025

References

1. Tehranipoor M., Koushanfar F. (2010) A Survey of Hardware Trojan Taxonomy and Detection. *IEEE Design & Test of Computers*. 27 (1), 10–25. DOI: 10.1109/MDT.2010.
2. Chen Z. (2020) Deep Learning for Cybersecurity: A Review. *2020 International Conference on Computing and Data Science (CDS), Stanford, CA, USA*. 7–18. DOI: 10.1109/CDS49703.2020.00009.
3. Yasaei R., Chen L., Yu S.-Y., Al Faruque M. A. (2025) Hardware Trojan Detection Using Graph Neural Networks. *IEEE Trans. Comput.-Aided Design Integr. Circuits Syst.* 44 (1), 25–38.
4. Ashok M., Turner M. J., Walsworth R. L., Levine E. V., Chandrakasan A. P. (2022). Hardware Trojan Detection Using Unsupervised Deep Learning on Quantum Diamond Microscope Magnetic Field Images. *ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems*. 18 (4), 1–25.
5. *Xilinx Power Estimator User Guide (UG440)*. Santa Clara, California: AMD/ Xilinx, 2023.
6. *Vivado Design Suite User Guide (UG901)*. Santa Clara, California: AMD/ Xilinx, 2020.
7. Tarasov I. E. (2021) *Xilinx FPGAs. VHDL and Verilog Hardware Description Languages, CAD, and Design Techniques*. Moscow, Goryachaya Liniya – Telekom Publ. (in Russian).
8. Belous A. I., Soloduha V. A., Shvedov S. V. (2019) *Software and Hardware Trojans – Methods of Deployment and Countermeasures. The First Technical Encyclopedia in Two Books*. Moscow, Technosphere Publ. (in Russian).

Received: 14 October 2025

Accepted: 25 November 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

Воронов А. Ю., асп. каф. микро- и наноэлектроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Стемпицкий В. Р., канд. тех. наук, доц., проректор по научной работе, научный руководитель НИЛ «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем», 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 29 353-52-74
E-mail: voronov.drawtoon@gmail.com
Воронов Алексей Юрьевич

Information about the authors

Voronov A. Yu., Postgraduade of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Stempitsky V. R., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, Adviser of the R&D Laboratory “Computer-Aided Design of Micro- and Nanoelectronic Systems”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 353-52-74
E-mail: voronov.drawtoon@gmail.com
Voronov Aleksey Yuryevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-80-86>

УДК 004.75; 621.311

ИНТЕГРАЦИЯ БЛОКЧЕЙНА И ФАЙЛОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ

В. А. ВИШНЯКОВ, ИВЭЙ СЯ

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

Аннотация. В статье рассмотрена интеграция технологий блокчейн, распределенной файловой системы и виртуализации (включая Virtual SAN, VSAN) для повышения конфиденциальности и эффективности хранения данных. Приведены ограничения традиционных централизованных моделей хранения, такие как уязвимость к фальсификации, малая гибкость в управлении доступом, сложность аудита и низкая эффективность использования ресурсов. Предложена концепция интегрированной системы хранения данных, основанная на умных контрактах в блокчейне, которая включает шифрование данных, реализацию стратегии управления доступом на основе атрибутов блокчейна, использование виртуализации с оптимизацией через VSAN, распределенное управление ключами и технологии усиления конфиденциальности (доказательство с нулевым разглашением, доверенная вычислительная среда). Предложенная архитектура обеспечивает гибкое управление доступом, эффективную обработку данных и высокий уровень безопасности в публичной или частной блокчейн-среде.

Ключевые слова: хранение данных, блокчейн, распределенная файловая система, конфиденциальность, управление доступом, умные контракты, технологии виртуализации, VSAN.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Вишняков, В. А. Интеграция блокчейна и файловой системы для конфиденциальности хранения данных / В. А. Вишняков, Ивэй Ся // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 80–86. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-80-86>.

INTEGRATING BLOCKCHAIN AND FILE SYSTEM FOR DATA PRIVACY

ULADZIMIR A. VISHNIAKOU, YIWEI XIA

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

Abstract. This article examines the integration of blockchain, distributed file system, and virtualization technologies (including Virtual SAN, VSAN) to improve data storage privacy and efficiency. The limitations of traditional centralized storage models are presented, such as vulnerability to tampering, limited flexibility in access control, difficulty in auditing, and low resource efficiency. A concept for an integrated data storage system based on blockchain smart contracts is proposed. This system incorporates data encryption, implementation of an access control strategy based on blockchain attributes, the use of virtualization optimized through VSAN, distributed key management, and privacy-enhancing technologies (zero-knowledge proof, trusted computing environment). The proposed architecture provides flexible access control, efficient data processing, and a high level of security in a public or private blockchain environment.

Keywords: data storage, blockchain, distributed file system, confidentiality, access control, smart contracts, virtualization technologies, VSAN.

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

For quoting. Vishniakou U. A., Yiwei Xia (2025) Integrating Blockchain and File System for Data Privacy. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 80–86. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-80-86> (in Russian).

Введение

Безопасность данных и защита конфиденциальности становятся ключевыми задачами на локальном и глобальном уровнях. Традиционные централизованные системы хранения сталкиваются с технологическими и доверительными вызовами при решении задач предотвращения утечек данных, защиты от внутренних угроз и соблюдения требований аудита. Технология блокчейн [1] обеспечивает неизменяемость аудиторских записей и прозрачность, распределенные файловые системы [2] предлагают избыточность данных и масштабируемость, а технологии виртуализации (включая виртуальные машины, контейнеры и виртуальные сети хранения данных (VSAN)) [3] повышают эффективность использования базовых ресурсов, упрощают управление и обеспечивают динамическое масштабирование, что позволяет оптимизировать общую производительность и эффективность системы данных.

Интеграция блокчейна и распределенных файловых систем с использованием технологий VSAN для построения виртуализированной инфраструктуры хранения данных позволяет одновременно обеспечивать конфиденциальность данных, управление доступом и гибкость в адаптации к изменениям нагрузки и распределению ресурсов. Технология VSAN объединяет традиционные устройства хранения в единый виртуализированный пул общей памяти, повышая производительность ввода-вывода, упрощая управление хранилищем. При наложении распределенных файловых систем на эту инфраструктуру под управлением политики доступа, реализованной в блокчейне, возможно создание высокопроизводительной и безопасной экосистемы хранения данных.

С развитием гипервизоров и их широким применением абстракция и виртуализация ресурсов хранения стали более практическими, что привело к появлению концепции программно-определенного хранения (Software-Defined Storage, SDS). В этом контексте технологии VSAN предложили стандартизованные и коммерчески доступные решения для виртуализации хранения, позволяя унифицировать устройства различных типов и производителей в высокопроизводительный и гибко управляемый пул ресурсов.

Одновременно с этим распределенные файловые системы также эволюционировали. От простых сетевых файловых систем с использованием протоколов NFS, CIFS до масштабируемых структур распределенного хранения данных, таких как Hadoop Distributed File System (HDFS), а в последние годы – до децентрализованных систем контент-адресации – IPFS и Filecoin. Современные распределенные файловые системы используют контент-адресацию, избыточность данных, шифрование и механизмы стимулирования, чтобы обеспечить высокую доступность и целостность данных.

Появление платформ для умных контрактов (Ethereum) и корпоративных блокчейн-решений (Hyperledger Fabric) позволило расширить сферу применения блокчейна, включая отслеживание поставок, управление доступом к данным и подтверждение прав на данные. Блокчейн способен сохранять метаданные файлов и правила доступа в неизменяемом виде, что особенно важно для аудита и восстановления доверия.

Рассмотрим разработанную архитектуру интегрированной системы, объединяющей блокчейн и распределенную файловую систему, с использованием VSAN для построения виртуализированной и конфиденциальной инфраструктуры хранения данных. Решены задачи по детализации клиентского компонента, умных контрактов, распределенного управления ключами, распределенной файловой системы IPFS, виртуального хранилища VSAN, модуля усиления конфиденциальности и разработки алгоритма умного контракта.

Техническая концепция интеграции

Для предотвращения фальсификации данные перед загрузкой в распределенные файловые системы (IPFS, Filecoin) должны быть зашифрованы на локальном уровне. Для этого часто используются симметричные алгоритмы шифрования (AES), которые позволяют быстро зашифровать большие файлы, создавая зашифрованный текст C , и управлять сравнительно коротким симметричным ключом K . Преимущество симметричного шифрования заключается в высокой скорости операций шифрования и дешифрования. Однако безопасность хранения и передачи ключа K и управление доступом к нему становятся ключевыми задачами.

Для решения этой проблемы предлагается разработать умные контракты в блокчейне, чтобы записывать контентный идентификатор зашифрованного файла (CID), политики доступа и зашифрованный симметричный ключ $\text{Enc}(K)$. $\text{Enc}(K)$ может быть защищен с использованием асимметричного и атрибутивного шифрования (ABE), что позволяет получить и дешифровать ключ только тем пользователям, которые соответствуют заданной политике доступа.

Размещение политик доступа в блокчейне является ключевым этапом для реализации распределенного управления доступом. Умные контракты в блокчейне представляют собой программируемые правила, которые невозможно изменить после публикации. При запросе доступа к определенным данным пользователь должен предоставить умному контракту доказательство с нулевым разглашением (Zero-Knowledge Proof, ZKP) [4] или другие данные, соответствующие условиям политики, например, обладание определенными ролями, атрибутами или правами.

Умные контракты обрабатывают запросы, используя данные, хранящиеся в блокчейне, включая параметры политик доступа, зашифрованные ключи и метаданные. Они фиксируют процесс и результаты запросов, формируя аудит, доступный для проверки. Технология VSAN обеспечивает высокую производительность хранения, необходимую для работы узлов блокчейна, включая хранение состояния контрактов и журналов. Это позволяет умным контрактам читать и записывать данные даже при высоком уровне одновременных запросов, поддерживая стабильность и плавность работы системы. Внедрение технологии VSAN дает возможность виртуализировать устройства хранения HDD, SSD и NVMe, объединяя их в единый виртуальный пул памяти, на основе которого работают узлы распределенных файловых систем, например, IPFS [5] и Filecoin.

В сценариях управления доступом пользователи часто не хотят раскрывать излишнюю информацию о своих атрибутах или конфиденциальных данных. Технология доказательства ZKP позволяет пользователям подтверждать соответствие определенным политикам доступа, не раскрывая содержание своих атрибутов. Доверенные вычислительные среды (Trusted Execution Environment, TEE) обеспечивают выполнение чувствительных вычислений, таких как восстановление ключей и авторизация расшифровки, в изолированной аппаратной среде, предотвращая утечку открытых ключей. Использование гомоморфного шифрования (HE) [6] позволяет выполнять вычисления непосредственно с зашифрованными данными, что открывает возможности для анализа и обработки данных без их расшифровки. Для обеспечения баланса между безопасностью, производительностью и стоимостью могут быть применены следующие стратегии.

1. Оптимизация избыточности. В сценариях с низким уровнем требований к безопасности или невысокой частотой доступа можно уменьшить количество избыточных копий или использовать кодирование с исправлением ошибок [7] вместо простого дублирования. Это снижает объем занимаемого пространства, но требует дополнительных вычислительных ресурсов для обработки кодирования и декодирования.

2. Многоуровневое хранение [8]. Данные классифицируются на основе частоты доступа и требований к задержке. Горячие данные размещаются на высокопроизводительных носителях (например, SSD или NVMe), в то время как холодные данные хранятся на более дешевых устройствах или в архивных уровнях.

3. Очистка и управление жизненным циклом данных. Удаление устаревших, избыточных или неиспользуемых данных освобождает место для хранения.

4. Внеконтурное хранение (Off-Chain Storage). Основной контент хранится в распределенных файловых системах, а в блокчейне фиксируются только хеши данных.

Архитектура системы интеграции и ее работа

Предлагаемая архитектура состоит из шести компонент: клиентского блока, умных контрактов, распределенного управления ключами, распределенной файловой системы IPFS, виртуализации и VSAN, модуля усиления конфиденциальности (рис. 1). Эти компоненты обеспечивают безопасное хранение данных, выполнение политик доступа и аудит.

1. Клиентский блок предоставляет конечным пользователям интерфейс для шифрования файлов и их загрузки. Пользователь локально в своей среде (на персональном компьютере или мобильном устройстве) шифрует файл с использованием симметричного алгоритма шифрования (например, AES), создавая зашифрованный текст C и симметричный ключ K . Этот подход позволяет пользователям загружать на сервер только зашифрованные данные, что снижает риск утечки информации при их передаче или хранении.

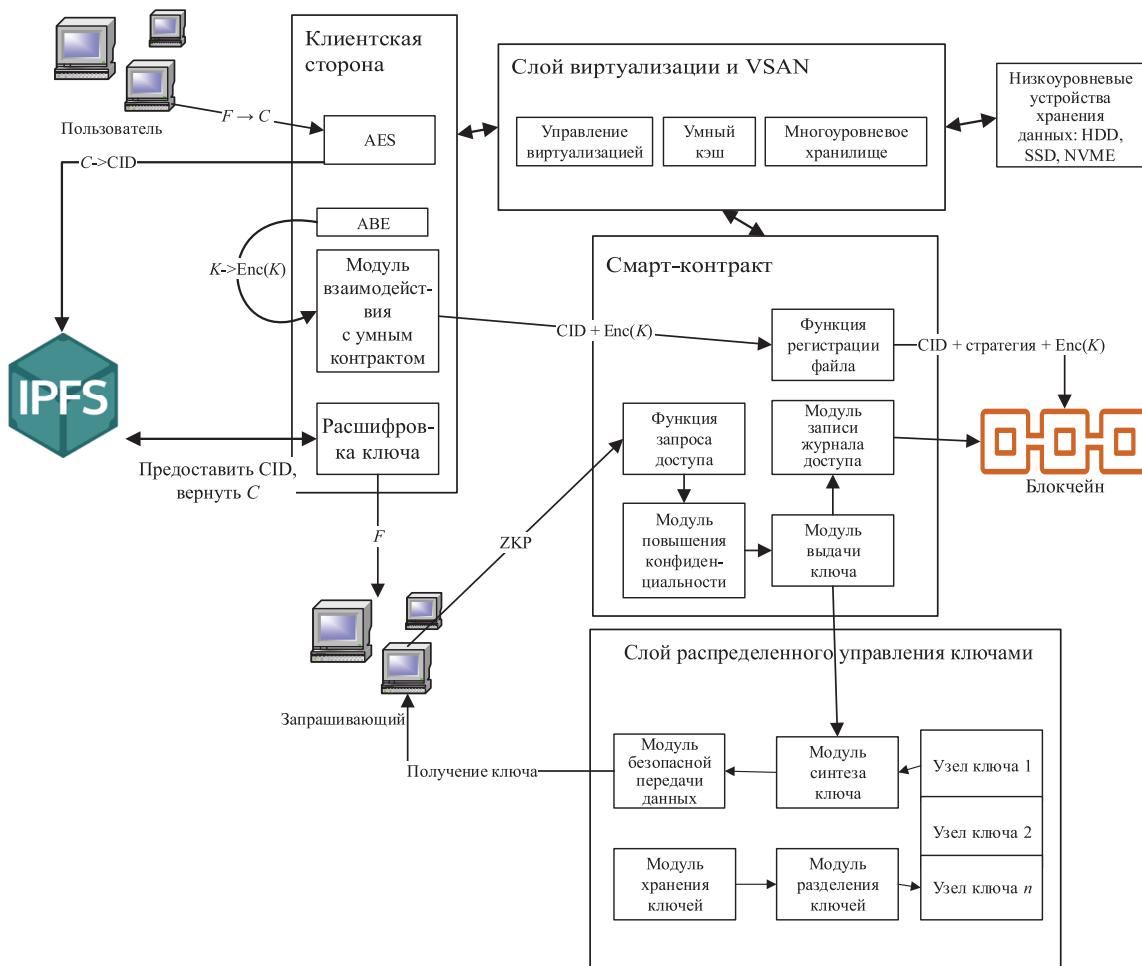


Рис. 1. Архитектура системы с распределенным управлением данными и усилением конфиденциальности
Fig. 1. System architecture with distributed data management and privacy enhancement

Клиентский интерфейс (веб-интерфейс) работает в облачной среде с поддержкой виртуализации и VSAN, что обеспечивает его масштабируемость и высокую гибкость при больших нагрузках. При загрузке файла пользователь локально шифрует исходный файл F , получая зашифрованный файл C и ключ K . Затем через клиентский интерфейс файл C отправляется в сеть IPFS, где генерируется его идентификатор CID. После этого ключ K шифруется с использованием технологии асимметричного шифрования, создавая $Enc(K)$. Пользователь вызывает функцию RegisterFile умного контракта, чтобы записать CID, $Enc(K)$ и политику доступа (на основе атрибутов, ролей или временных окон) в блокчейн. Это создает правила доступа и управления ключами на уровне блокчейна.

2. Умные контракты, программируемые на платформе блокчейна, предоставляют неизменяемую среду для определения политик доступа к данным, для управления ключами и аудита. Умные контракты хранят CID, $Enc(K)$, политики доступа, выполняют проверку доступа и ведут аудит запросов. На этапе регистрации файлов пользователь вызывает функцию RegisterFile для записи CID, $Enc(K)$ и политик доступа в блокчейн. На этапе запроса доступа пользователь отправляет запрос RequestAccess с ZKP, чтобы подтвердить соответствие политикам доступа. Умный контракт проверяет доказательство и в случае успеха уведомляет слой управления ключами для выпуска ключа K .

3. Слой распределенного управления ключами использует методы пороговой криптографии, такие как схема разделения секрета Шамира (Shamir Secret Sharing), для разделения симметричного ключа K на n фрагментов, которые хранятся на независимых узлах управления ключами. Для восстановления ключа K требуется одновременное участие не менее t фрагментов и авторизация умного контракта. После проверки доступа умным контрактом узлы управления ключами извлекают свои фрагменты ключей. Затем в TEE выполняется безопасное восстановление клю-

ча K , который остается защищенным от несанкционированного доступа. Полученный ключ K передается авторизованному пользователю через безопасный канал.

4. Слой распределенной файловой системы IPFS отвечает за фрагментацию зашифрованного файла C и его хранение с использованием контентного адреса. IPFS разделяет C на блоки данных, которые распределяются между различными узлами для повышения отказоустойчивости и доступности данных. На этапе загрузки файл C передается в сеть IPFS, где вычисляется хеш-функция, генерирующая CID, а блоки данных распределяются между узлами. На этапе доступа пользователь, имея ключ K , с помощью CID запрашивает и восстанавливает зашифрованный файл C , затем локально дешифрует его, получая исходный файл F .

5. Слой виртуализации и VSAN виртуализируют различные устройства хранения данных (HDD, SSD, NVMe), объединяя их в единый пул ресурсов. Это позволяет обеспечить высокую производительность ввода-вывода (IO) и гибкость для узлов блокчейна, IPFS и управления ключами. VSAN автоматически перераспределяет ресурсы в зависимости от нагрузки и типа данных (горячие или холодные), применяя стратегии избыточности и многоуровневого хранения. Быстрое извлечение данных из высокопроизводительных кэшей и перенос холодных данных на более дешевые устройства минимизируют задержки и оптимизируют использование ресурсов.

6. Модуль усиления конфиденциальности включает технологии доказательства с ZKP, TEE и HEE. Эти технологии обеспечивают проверку доступа и управление ключами без раскрытия конфиденциальной информации. ZKP позволяет пользователю доказать соответствие политике доступа без раскрытия атрибутов. TEE обеспечивает выполнение операций восстановления ключей и других чувствительных вычислений в защищенной среде, не позволяя выполнять вычисления непосредственно над зашифрованными данными, сохраняя их конфиденциальность.

Алгоритмы смарт-контракта

Разработаны алгоритм умного контракта и его функции в управлении доступом к данным. Алгоритм работы смарт-контракта показан на рис. 2, схема его работы включает следующие этапы.

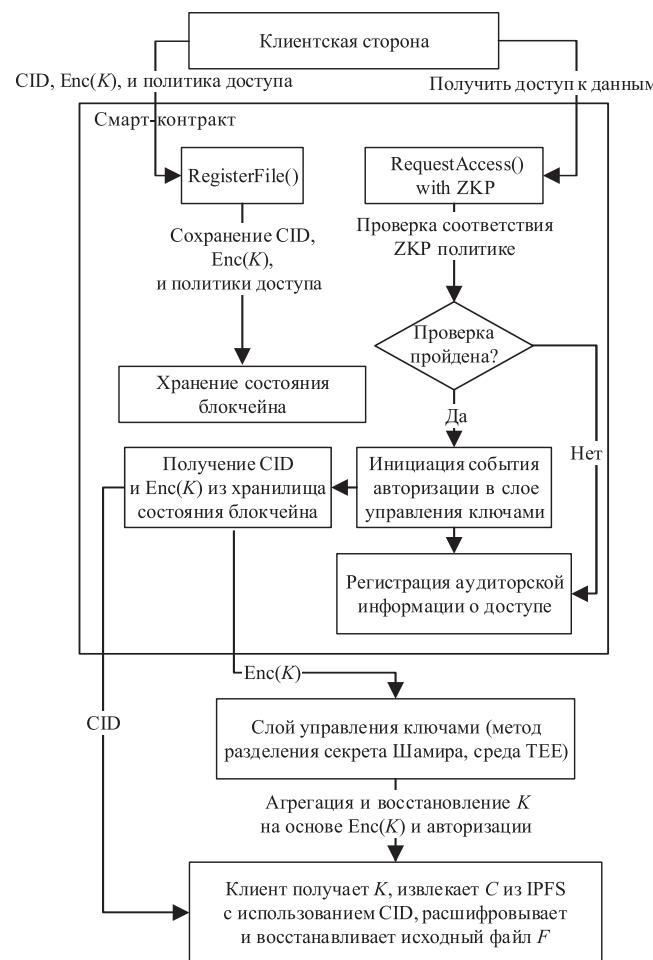


Рис. 2. Алгоритм смарт-контракта для управления доступом к данным

Fig. 2. Smart contract algorithm for data access management

А. Регистрация файлов и запись в блокчейн:

- пользователь локально шифрует файл F с использованием AES, получая C и K ;
- ключ K шифруется с использованием ABE или асимметричного шифрования, создавая $\text{Enc}(K)$;
- файл C загружается в IPFS, где вычисляется CID;
- пользователь вызывает функцию `RegisterFile`, чтобы записать CID, $\text{Enc}(K)$ и политику доступа в блокчейн.

В. Запрос доступа и проверка:

- пользователь отправляет запрос `RequestAccess` с ZKP;
- смарт-контракт проверяет ZKP с использованием данных из блокчейна;
- в случае успеха смарт-контракт уведомляет о разрешении в слое управления ключами.

С. Выпуск ключа и дешифрование данных:

- узлы управления ключами извлекают фрагменты из VSAN;
- в TEE происходит восстановление ключа K ;
- пользователь использует K для дешифрования C , восстанавливая файл F .

Д. Аудит и управление:

- все взаимодействия записываются в блокчейне для аудита;
- системы VSAN и блокчейн совместно управляют очисткой данных и архивацией.

Заключение

1. Представлена архитектура хранения данных, основанная на интеграции технологий блокчейн, распределенных файловых систем и виртуализации/VSAN, направленная на повышение конфиденциальности данных, гибкости управления доступом и производительности системы. Определение политик доступа в умном контракте и шифрование данных с их хранением в распределенных файловых системах, дополненное технологиями усиления конфиденциальности (ZKP, TEE, HE) и поддержкой виртуализированного пула хранения VSAN, позволяют создать высокозащищенную, масштабируемую систему хранения и доступа к данным.

2. Разработан алгоритм умного контракта, включающий шифрование файла F и запись CID, $\text{Enc}(K)$, политики доступа в блокчейн. При запросе доступа от пользователя умный контракт проверяет ZKP с использованием данных из блокчейна, при успехе уведомляет о разрешении слой управления ключами, последний извлекает фрагменты из хранилища VSAN (ключ K для восстанавливая исходного файла F). Все взаимодействия записываются в блокчейне для аудита.

3. Архитектура интегрированной системы состоит из шести компонент: клиентского блока, умных контрактов, распределенного управления ключами, распределенной файловой системы IPFS, визуализации и VSAN, модуля усиления конфиденциальности. Она выполняет регистрацию файлов и запись в блокчейне, запрос доступа и проверку, выпуск ключа и дешифрование данных, аудит и управление. Преимущества этой системы перед аналогами заключаются в обеспечении конфиденциальности данных и баланса между безопасностью, производительностью и стоимостью за счет оптимизации избыточности, многоуровневого хранения и управления жизненным циклом данных, в их защите благодаря криптографии блокчейна.

Список литературы

1. Вишняков, В. А. Использование блокчейна Ethereum в сети интернета вещей для ИТ-диагностики / В. А. Вишняков, Ивэй Ся, Чуюэ Юй // Цифровая трансформация. 2024. Т. 30, № 3. С. 61–68. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-3-61-68>.
2. Pan, X. Navigating the Landscape of Distributed File Systems: Architectures, Implementations, and Considerations / X. Pan, Z. Luo, L. Zhou // arXiv preprint arXiv:2403.15701. 2024.
3. Современные технологии хранения данных в условиях Industry 4.0 / В. А. Касумов [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 95–103. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-95-103>.
4. Kalbantner, J. ZKP Enabled Identity and Reputation Verification in P2P Marketplaces / J. Kalbantner // 2024 IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain). 2024. P. 591–598.
5. A Closer Look into IPFS: Accessibility, Content, and Performance / R. Shi [et al.] // Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems. 2024. Vol. 8, No 2. P. 1–31.
6. Sok: Fully Homomorphic Encryption Accelerators / J. Zhang [et al.] // ACM Computing Surveys. 2024. Vol. 56, No 12. P. 1–32.

7. Data Repair Accelerating Scheme for Erasure-Coded Storage System Based on FPGA and Hierarchical Parallel Decoding Structure / J. Chen [et al.] // Cluster Computing. 2024. Vol. 2. P. 1–21.
8. Cloud Storage Cost: A Taxonomy and Survey / A. Q. Khan [et al.] // World Wide Web. 2024. Vol. 27, No 4.

Поступила 29.09.2025

Принята в печать 14.11.2025

References

1. Vishniakou U. A., Ywey Xia, Chuey Yu (2024) Using the Ethereum Blockchain in the Internet of Things Network for IT Diagnostics. *Digital Transformation*. 30 (3), 61–68. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-3-61-68> (in Russian).
2. Pan X., Luo Z., Zhou L. (2024) Navigating the Landscape of Distributed File Systems: Architectures, Implementations, and Considerations. *ArXiv preprint arXiv:2403.15701*.
3. Gasimov V. A., Aliyeva Sh. Kh., Garashli T. J., Asadova M. Y. (2024) Modern Data Storage Technologies in the Context of Industry 4.0. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 95–103. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-95-103> (in Russian).
4. Kalbantner J. (2024) ZKP Enabled Identity and Reputation Verification in P2P Marketplaces. *IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain)*. 591–598.
5. Shi R. A., Cheng R., Han B., Cheng Y., Chen S. (2024) Closer Look into IPFS: Accessibility, Content, and Performance. *Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems*. 8 (2), 1–31.
6. Zhang J., Cheng X., Yang L., Hu J., Liu X., Chen K. (2024) Sok: Fully Homomorphic Encryption Accelerators. *ACM Computing Surveys*. 56 (12), 1–32.
7. Chen J., Yang S., Wang Y., Ye M., Lei F. (2024) Data Repair Accelerating Scheme for Erasure-Coded Storage System Based on FPGA and Hierarchical Parallel Decoding Structure. *Cluster Computing*. 2, 1–21.
8. Khan A. Q., Matskin M., Prodan R., Bussler C., Roman D., Soylu A. (2024) Cloud Storage Cost: A Taxonomy and Survey. *World Wide Web*. 27 (4).

Received: 29 September 2025

Accepted: 14 November 2025

Вклад авторов

Вишняков В. А. выполнил постановку задачи, предложил концепцию интеграции, предоставил информацию о выбранной экспериментально платформе интернета вещей.

Ивэй Ся разработал алгоритм смарт-контракта, провел детализацию архитектуры.

Authors' contribution

Vishniakou U. A. completed the task statement, proposed the concept of integration, and provided information about the experimentally selected Internet of things platform.

Yiwei Xia developed the algorithm for a smart contract, carried out a detailed architecture.

Сведения об авторах

Вишняков В. А., д-р техн. наук, проф. каф. инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Ивэй Ся, асп. каф. инфокоммуникационных технологий, 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 44 486-71-82
E-mail: vish@bsuir.by
Вишняков Владимир Анатольевич

Information about the authors

Vishniakou U. A., Dr. Sci. (Tech.), Professor at the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Yiwei Xia, Postgraduate at the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 44 486-71-82
E-mail: vish@bsuir.by
Vishniakou Uladzimir Anatolievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-87-95>

УДК 004.33.054

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ТЕСТОВ

В. Н. ЯРМОЛИК¹, И. МРОЗЕК², П. Ю. БРАНЦЕВИЧ¹, Д. В. ДЕМЕНКОВЕЦ¹,
В. А. ЛЕВАНЦЕВИЧ¹

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

²*Белостокский технологический университет (Белосток, Республика Польша)*

Аннотация. Проведен анализ методов построения управляемых вероятностных тестов, которые базируются на масштабировании исходных шаблонов, представляющих собой тесты с малым числом наборов и небольшой их разрядностью. Отмечены достоинства и недостатки подходов, основанных на масштабировании и дающих возможность существенно снизить вычислительные затраты, необходимые для построения управляемых вероятностных тестов с заданными характеристиками. Сформулирован общий подход для построения управляемых вероятностных тестов на основе масштабирующей матрицы, позволяющей применять тесты малой размерности. Показана эффективность двухмерного масштабирования как двоичных векторов, так и шаблонов, что увеличивает не только разрядность тестовых наборов, но и их количество. Получены зависимости для определения показателей результирующего теста на основании характеристик масштабирующей матрицы и шаблона.

Ключевые слова: масштабирующая матрица, управляемый вероятностный тест, тестовый набор, мера различия, расстояние Хэмминга.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Метод построения управляемых вероятностных тестов / В. Н. Ярмолик [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 87–95. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-87-95>.

METHOD OF CONTROLLED RANDOM TESTS GENERATION

VYACHESLAV N. YARMOLIK¹, IRENEUSZ MROZEK², PIOTR YU. BRANCEVICH¹,
DENIS V. DEMENKOVETS¹, VLADIMER A. LEVANTSEVICH¹

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

²*Bialystok University of Technology (Bialystok, Republic of Poland)*

Abstract. This paper analyzes methods for constructing controlled random tests based on scaling initial templates representing tests with a small number of patterns and low bit size. The advantages and disadvantages of scaling-based approaches, which can significantly reduce the computational costs required to construct controlled random tests with specified characteristics, are highlighted. A general approach for constructing controlled random tests based on a scaling matrix is formulated, allowing the use of low-dimensional tests. The effectiveness of two-dimensional scaling of both binary vectors and templates is demonstrated, increasing not only the bit size of test patterns but also their number. Dependencies for determining the resulting test metrics based on the characteristics of the scaling matrix and template are obtained.

Keywords: scaling matrix, controlled random test, test pattern, dissimilarity measure, Hamming distance.

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

For citation. Yarmolik V. N., Mrozek I., Brancevich P. Yu., Demenkovets D. V., Levantsevich V. A. (2025) Method of Controlled Random Tests Generation. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 87–95. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-87-95> (in Russian).

Введение

Для современных вычислительных систем важным является применение систематических методов построения тестовых процедур, обеспечивающих высокое качество их функционирования [1–3]. Достаточно много методов автоматизированного синтеза тестов основано на вероятностном подходе их генерирования [2, 3]. Главный недостаток вероятностного тестирования – его временная сложность, связанная с большим количеством тестовых наборов в применяемых тестах. В связи с этим в настоящее время активно развиваются новые методы построения тестов, в которых вероятностный подход подвергается различного рода модификациям и усовершенствованиям. Значимое место среди них занимают управляемые (адаптивные) вероятностные тесты (adaptive random tests) [3–6]. Данный вид тестов основан на применении различных характеристик для управляемого формирования очередного случайного тестового набора. Большинство таких тестов основано на применении расстояния Хэмминга в качестве характеристики, определяющей выбор очередного набора, включаемого в тест [3–7].

Тестовый набор выбирается из потенциальных кандидатов, сгенерированных случайным образом, по критерию максимальности значения меры/мер различия. Чем больше значения критериев выбора, например, расстояния Хэмминга, тем сложнее процедура выбора тестового набора, и существенно меньшее их количество будет включено в формируемый управляемый вероятностный тест [7–9]. Таким образом, задача построения управляемых вероятностных тестов с заданным пороговым расстоянием Хэмминга, как критерием включения кандидата в генерируемый тест и невысокой вычислительной сложности, по-прежнему является актуальной.

Анализ управляемых вероятностных тестов

В соответствии с гипотезой, что для теста, состоящего из множества максимально отличающихся друг от друга наборов, количество обнаруживаемых неисправностей (ошибок) этим тестом будет максимальным [3–5], процедура построения управляемых вероятностных тестов заключается в выборе очередного тестового набора, максимально отличающегося от наборов, ранее включенных в тест. В общем случае определение очередного тестового набора основано на применении количественных характеристик различия, в качестве которых чаще всего применяются расстояние Хэмминга и Евклидово расстояние [4, 5].

Не нарушая общности изложения материала, будем рассматривать случай двоичных тестовых наборов $T_i = t_{i,0} t_{i,1} \dots t_{i,r-1}$ (где $t_{i,l} \in \{0, 1\}$; $i \in \{0, 1, \dots, q-1\}$; $l \in \{0, 1, \dots, r-1\}$) управляемого вероятностного теста, включающего q наборов T_0, T_1, \dots, T_{q-1} , где тестовый набор T_i представляет собой двоичный вектор $t_{i,0} t_{i,1} \dots t_{i,r-1}$, состоящий из r бит. С использованием в качестве критерия выбора тестовых наборов порогового значения расстояния Хэмминга $d = \min HD(T_i, T_j)$ ($i \neq j \in \{0, 1, \dots, q-1\}$) управляемый вероятностный тест $CRT(q, d, r)$ может быть описан тремя параметрами, а именно: количеством тестовых наборов q , их разрядностью r и пороговым значением расстояния Хэмминга d . Приведенное определение управляемого вероятностного теста $CRT(q, d, r)$ позволяет использовать ранее полученные результаты как в области тестирования, так и в области помехоустойчивого кодирования [3–5, 8, 9]. Примеры множеств двоичных наборов с малой разрядностью r , которые интерпретируются как управляемые вероятностные тесты $CRT(q, d, r) = T_0, T_1, \dots, T_{q-1}$, приведены в табл. 1, где тест $MMHD(4)$ представляет собой $MMHD(q)$ (Maximum Minimum Hamming Distance) для $q = 4$ с максимальным минимальным расстоянием Хэмминга $\min HD(T_i, T_j) = 2$, который описывается как $CRT(4, 2, 3)$ [3, 7].

Таблица 1. Примеры управляемых вероятностных тестов

Table 1. Examples of control random tests

$MMHD(4)$	$OCRT_1$		$OCRT_2$		$PExT_1(2, 4)$		$PExT_2(2, 4)$		
T_0	0 0 0	T_0	0 0	T_0	0 0 0 0	T_0	0 0 0 0	T_0	1 1 0 0
T_1	0 1 1	T_1	0 1	T_1	1 1 1 1	T_1	0 1 1 1	T_1	0 1 1 0
T_2	1 0 1	T_2	1 0	T_2	0 0 1 1	T_2	1 0 1 1	T_2	0 0 1 1
T_3	1 1 0	T_3	1 1	T_3	1 1 0 0	T_3	1 1 0 1	T_3	1 0 1 0
$CRT(4, 2, 3)$	$CRT(4, 1, 2)$		T_4	0 1 0 1	T_4	1 1 1 0	T_4	0 1 0 1	
	T_5	1 0 1 0	$CRT(5, 2, 4)$		T_5	1 0 0 1	$CRT(6, 2, 4)$		
	$CRT(6, 2, 4)$						$CRT(6, 2, 4)$		

Тесты $OCRT_1$ и $OCRT_2$ построены с применением расстояния Хэмминга $HD(T_i, T_j)$ и Евклидова расстояния $CD(T_i, T_j)$ для тестовых наборов T_i и T_j . Они относятся к множеству оптимальных управляемых тестов (Optimal Controlled Random Tests) [3]. Подобные тесты характеризуются тем, что для них $HD(T_i, T_j) \geq r/2$. В общем случае количество наборов теста $OCRT$ определяется как $q = 2(\lceil \log_2 r \rceil + 1)$. Для случая, когда $r = 2^c$, где c – натуральное число, количество q наборов равняется $2(c + 1)$. Например, для $r = 2^1$ количество q тестовых наборов теста $OCRT_1$ равняется 4, а для $r = 2^2 = 4$ ($OCRT_2$), соответственно, 6 (табл. 1). Тесты $OCRT_1$ и $OCRT_2$ описываются как управляемые вероятностные тесты $CRT(4, 1, 2)$ и $CRT(6, 2, 4)$. Последующие тесты $PExT_1(2, 4)$ и $PExT_2(2, 4)$, приведенные в табл. 1, относятся к множеству псевдоисчерпывающих тестов $PExT(k, r)$, где $k < r$, которые представляют собой множество двоичных наборов, обеспечивающих все возможные 2^k двоичные комбинации на любых k из r разрядах его тестовых наборов [3]. Эти тесты можно интерпретировать как $CRT(5, 2, 4)$ и $CRT(6, 2, 4)$. Любой исчерпывающий тест $ExT(r)$, формирующий все возможные 2^r двоичные комбинации, можно описать как $CRT(2^r, 1, r)$. Тест $OCRT_1$ можно рассматривать как исчерпывающий тест $ExT(2)$ и, соответственно, описываемый как $CRT(2^2, 1, 2)$.

В качестве критерия выбора кандидата в тестовые наборы и описания формируемого управляемого вероятностного теста, кроме порогового значения расстояния Хэмминга $d = \min HD(T_i, T_j)$, часто используется суммарное значение расстояний Хэмминга $totalHD(T_i, T_j)$, либо их среднее значение $aveHD(T_i, T_j)$ [7]. Эти характеристики выбора тестовых наборов вычисляются согласно выражениям:

$$totalHD(T_i, T_j) = \sum_{i=0}^{q-2} \sum_{j=i+1}^{q-1} HD(T_i, T_j); \quad aveHD(T_i, T_j) = \frac{totalHD(T_i, T_j)}{\binom{q}{2}}. \quad (1)$$

Приведенные в табл. 1 примеры управляемых вероятностных тестов для малых разрядностей r позволяют сформулировать понятие шаблона управляемого вероятностного теста [7]. Под тестовым шаблоном $CRT_{tm}(q, d, r)$ будем понимать произвольный управляемый вероятностный тест $CRT(q, d, r)$ с фиксированным количеством тестовых наборов q , заданным значением порогового расстояния Хэмминга $d = \min HD(T_i, T_j)$ и разрядностью r тестовых наборов. Такой тест, используемый как шаблон, применяется для синтеза аналогичных тестов с требуемой разрядностью, большей чем разрядность самого шаблона [7].

Известно, что на основании исходного шаблона $CRT_{tm}(q, d, r)$ оказывается возможным построение их семейства при использовании правил преобразования двоичных кодов, исследуемых и применяемых в теории помехоустойчивого кодирования [8, 9]. Эти правила позволяют модифицировать исходный шаблон, сохраняя при этом значения и соотношения его характеристик q , d и r . Для построения теста с заданной разрядностью наборов могут применяться один либо несколько шаблонов с меньшей разрядностью, что дает возможность исключить трудоемкую процедуру для построения искомого теста. Рассмотренные ранее процедуры одномерного масштабирования позволяют на основании k шаблонов $CRT_{tm0}(q_0, d_0, r_0)$, $CRT_{tm1}(q_1, d_1, r_1)$, ..., $CRT_{tmk}(q_{k-1}, d_{k-1}, r_{k-1})$ с применением правил повторения и объединения построить тест $CRT(q, d, r)$ со следующими характеристиками:

$$q = \min(q_i), i \in \{0, 1, 2, \dots, k-1\}; \quad d = \sum_{i=0}^{k-1} d_i; \quad r = \sum_{i=0}^{k-1} r_i. \quad (2)$$

Целевыми функциями при построении нового теста $CRT(q, d, r)$ на основании шаблонов являются требуемая разрядность r тестовых наборов и пороговое значение расстояния Хэмминга d . Например, для случая, когда $r = 16$ и $d = 8$, решением может быть применение двух шаблонов $OCRT_2$ и $PExT_1(2, 4)$, приведенных в табл. 1, и двух их модификаций. Это следует из того, что, согласно (2), сумма разрядностей четырех исходных тестов равняется 16. Результирующий тест $CRT(5, 8, 16)$ приведен в табл. 2.

Таблица 2. Пример построения управляемого вероятностного теста $CRT(5, 8, 16)$
Table 2. An example of constructing a controlled random test $CRT(5, 8, 16)$

	$OCRT_2$	$PExT_1(2, 4)$	$\overline{OCRT_2}$	$\overline{PExT_1(2, 4)}$
T_0	0 0 0 0	0 0 0 0	1 1 1 1	1 1 1 1
T_1	1 1 1 1	0 1 1 1	0 0 0 0	1 0 0 0
T_2	0 0 1 1	1 0 1 1	1 1 0 0	0 1 0 0
T_3	1 1 0 0	1 1 0 1	0 0 1 1	0 0 1 0
T_4	0 1 0 1	1 1 1 0	1 0 1 0	0 0 0 1
$CRT(5, 8, 16)$				

Следует отметить, что для результирующего теста $q = \min(6, 5) = 5$ (табл. 1), поэтому из теста $OCRT_2$ исключен последний тестовый набор $T_5 = 1010$. В общем случае уменьшение количества q тестовых наборов теста $CRT(q, d, r)$ путем их удаления не влияет на значение r и не приводит к уменьшению величины d . В качестве модификаций тестов $OCRT_2$ и $PExT_1(2, 4)$ использовались множества их инверсных наборов $\overline{OCRT_2}$ и $\overline{PExT_1(2, 4)}$. Совокупность четырех исходных тестов представляет собой искомый тест $CRT(5, 8, 16)$ с требуемой разрядностью $r = 16$ и расстоянием Хэмминга $d = 8$. Такая же разрядность наборов $r = 16$, как и у теста $CRT(5, 8, 16)$, может быть получена при использовании $MMHD(4)$ в качестве четырех шаблонов совместно с двумя шаблонами, представленными тестом $OCRT_1$. В итоге формируется тест $CRT(4, 10, 16)$ с меньшим числом наборов $q = 4$, однако с большим пороговым значением $d = 10$.

Рассмотренные подходы построения управляемых вероятностных тестов $CRT(q, d, r)$ на базе шаблонов $CRT_{tm}(q, d, r)$ преследуют цель обеспечения требуемой разрядности тестовых наборов формируемого теста, т. е. одномерного масштабирования шаблонов. Что касается количества наборов q при требуемом значении d , то, согласно (2), оно остается практически неизменным и небольшим, что предопределило необходимость двухмерного масштабирования шаблонов, требующего одновременного увеличения как разрядности тестовых наборов, так и их количества.

В [10] рассмотрен подход, основанный на двухмерном масштабировании исходных шаблонов с применением матриц Адамара, которые позволяют выполнять процедуру масштабирования в $n \in \{2, 4, 8, \dots\}$ раз в зависимости от порядка $n = 2^c$ используемой матрицы. Само масштабирование заключается в применении в качестве элемента (+1) оригинальной матрицы Адамара масштабируемого теста $CRT_{tm}(q, d, r)$, а вместо элемента (-1) – его инверсного представления $\overline{CRT_{tm}(q, d, r)}$. Для общего случая двухмерного масштабирования шаблонов либо произвольных управляемых вероятностных тестов с использованием матриц Адамара справедливо следующее утверждение [10].

Утверждение 1. Результатом масштабирования управляемого вероятностного теста $CRT_{tm}(q, d, r)$ при $d \leq r/2$ с помощью матрицы Адамара n -го порядка является тест $CRT(n \cdot q, n \cdot d, n \cdot r)$, а при $d > r/2$ формируется тест $CRT(n \cdot q, (n \cdot r)/2, n \cdot r)$.

В отличие от подхода, основанного на одномерном масштабировании, результирующий управляемый вероятностный тест в случае применения матриц Адамара порядка n содержит в n раз больше тестовых наборов. Сама процедура масштабирования в сравнении с классическим подходом построения управляемых вероятностных тестов не требует вычисления меры (мер) различия, что существенно уменьшает вычислительные затраты. Отсутствие необходимости перечисления кандидатов в тестовые наборы сводит задачу синтеза управляемого вероятностного теста к формальной процедуре [10]. Специфика и свойства матриц Адамара накладывают ограничения на характеристики тестовых наборов и в первую очередь на их разрядность, не допускающую широкого выбора ее значений.

Двухмерное масштабирование как метод построения управляемых вероятностных тестов

Рассмотрим подход построения управляемых вероятностных тестов, основанный на использовании масштабирующей матрицы. В качестве подобной матрицы для целей формирования тестов с большим количеством наборов и с их увеличенной разрядностью по сравнению с выбран-

ным шаблоном использовались матрицы Адамара [10]. Взяв за основу саму идею двухмерного масштабирования, рассмотрим его применение в рамках управляемых вероятностных тестов, когда масштабирующая матрица, так же, как и шаблон, представляет собой управляемый вероятностный тест. Очевидно, что возможны разнообразные сочетания управляемых вероятностных тестов, используемых как для масштабирования, так и в качестве шаблонов (масштабируемых тестов).

Критерием включения в тест кандидата в тестовые наборы является его максимальное отличие (удаление) от ранее сгенерированных наборов, определяемое расстоянием Хэмминга. Поэтому в качестве масштабирующего управляемого вероятностного теста $CRT_{sc}(q_s, d_s, r_s)$ необходимо применять тесты, для которых d_s , как пороговое значение меры различия, принимает максимально возможное значение при небольших величинах q_s и r_s , требующих их масштабирования. Не нарушая общности дальнейшего изложения, используем тест $CRT_{sc}(4, 2, 3)$ в качестве масштабирующей матрицы. Этот тест, представленный в табл. 1 как $MMHD(4)$, также можно интерпретировать как псевдоисчерпывающий тест $PExT(2, 3)$ [11]. Данный тест, согласно теории помехоустойчивого кодирования, характеризуется максимальным значением величин $d = 2$ для $q = 4$ и $r = 3$ [8, 9].

Аналогично, как и в случае матриц Адамара, будем рассматривать нулевые и единичные элементы масштабирующего теста $CRT_{sc}(4, 2, 3)$ как двоичные данные, которые для нулевых значений этого теста принимают свое оригинальное значение, а для единичных – инверсное. В качестве двоичных данных могут быть использованы как двоичные векторы произвольной разрядности, так и двоичные матрицы, в том числе шаблоны $CRT_{tm}(q, d, r)$ управляемых вероятностных тестов. Рассмотрим случай, когда в качестве шаблона используется один тестовый набор $T = t_0 t_1 \dots t_{r-1}$, представляющий собой двоичный вектор произвольной разрядности $r \geq 1$. Тогда в соответствии со структурой $CRT_{sc}(4, 2, 3)$ (табл. 1) его двоичные значения 0 и 1 заменяются на двоичные векторы T и \bar{T} , состоящие из $r \geq 1$ разрядов, соответственно 0 заменяется на $T = t_0 t_1 \dots t_{r-1}$, а 1 – на $\bar{T} = \bar{t}_1 \bar{t}_2 \dots \bar{t}_r$, либо наоборот. В общем случае двоичный вектор T может представлять собой произвольный набор, состоящий из 0 и 1. Например, используя двоичный набор $T = 0 0 1$ ($r = 3$) и его инверсию $\bar{T} = 1 1 0$ для случая $CRT_{sc}(q_s, d_s, r_s) = CRT_{sc}(4, 2, 3)$, результирующий тест $CRT_{ou}(q_o, d_o, r_o)$ примет вид, как показано в табл. 3.

Таблица 3. Пример масштабирования двоичного набора $T = 0 0 1$

Table 3. An example of scaling a binary pattern $T = 0 0 1$

$CRT_{sc}(4, 2, 3)$	$CRT_{ou}(q_o, d_o, r_o)$	$CRT_{ou}(4, 6, 9)$
0 0 0	$T_0 = T \ T \ T$	$T_0 = 0 0 1 0 0 1 0 0 1$
0 1 1	$T_1 = T \ \bar{T} \ \bar{T}$	$T_1 = 0 0 1 1 1 0 1 1 0$
1 0 1	$T_2 = \bar{T} \ T \ \bar{T}$	$T_2 = 1 1 0 0 0 1 1 1 0$
1 1 0	$T_3 = \bar{T} \ \bar{T} \ T$	$T_3 = 1 1 0 1 1 0 0 0 1$

Как видно из табл. 3, параметры q_o и r_o нового теста $CRT_{ou}(4, 6, 9)$ очевидным образом зависят от q_s и r_s масштабирующего теста $CRT_{sc}(4, 2, 3)$ и разрядности $r = 3$ двоичного вектора T : соответственно, $q_o = q_s$, а $r_o = r \times r_s$. Выполнение равенства $d_o = r \times d_s$ следует из свойств расстояния Хэмминга [7–9]:

$$HD(T_i, T_j) = HD(\bar{T}_i, \bar{T}_j); \quad HD(T_i, \bar{T}_j) = HD(\bar{T}_i, T_j); \quad HD(T_i, T_j) + HD(T_i, \bar{T}_j) = r, \quad (3)$$

где r – произвольная разрядность исходных двоичных наборов T_i и T_j , $r \geq 1$.

Таким образом, используя масштабирующий тест $CRT_{sc}(q_s, d_s, r_s)$, оказывается возможным построение нового теста $CRT_{ou}(q_o, d_o, r_o)$, состоящего из такого же количества тестовых наборов $q_o = q_s$ и требуемой разрядности $m > r$ тестовых наборов T_i . Пороговое расстояние Хэмминга в этом случае будет зависеть от размерности r исходного вектора T , равной величине $\lfloor m/r_s \rfloor$ или $\lceil m/r_s \rceil$, и определяться согласно равенству $d_o = \lfloor m/r_s \rfloor \times d_s$. Например, для $CRT_{sc}(q_s, d_s, r_s) = CRT_{sc}(4, 2, 3)$ и $m = 12$, применяя произвольный двоичный набор T , состоящий из $r = \lfloor m/r_s \rfloor = \lfloor 12/3 \rfloor = 4$ бит, формируется тест $CRT_{ou}(q_o, d_o, r_o) = CRT_{ou}(4, 8, 12)$.

Рассмотренная методика построения теста $CRT_{ou}(q_o, d_o, r_o)$ может быть обобщена на случай произвольного масштабирующего теста $CRT_{sc}(q_s, d_s, r_s)$, а также интерпретироваться как двухмерное масштабирование произвольного тестового набора T , когда увеличивается не только разрядность тестовых наборов до $r_o = r_s \times r_t$, но и их количество с одного набора до $q_o = q_s$ наборов в результирующем teste.

Существенно большее количество тестовых наборов для искомого теста $CRT_{ou}(q_o, d_o, r_o)$ может быть получено в случае, когда масштабированию будет подвергаться не один набор T , а их множество, представленное, например, шаблоном $CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t)$. Тогда результирующий тест $CRT_{ou}(q_o, d_o, r_o)$ будет содержать $q_o = q_s \times q_t$, где q_s определяет количество наборов масштабирующего теста $CRT_{sc}(q_s, d_s, r_s)$, а их разрядность r_o определяется как $r_s \times r_t$. Как пример двухмерного масштабирования рассмотрим случай применения в качестве масштабирующего теста $CRT_{sc}(q_s, d_s, r_s)$ и шаблона $CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t)$ теста $MMHD(4) = CRT(4, 2, 3)$, имеющего наилучшее сочетание значений характеристик d, q и r (табл. 4). Во втором столбце табл. 4 приведен результат масштабирования с применением $CRT_{sc}(q_s, d_s, r_s) = CRT_{sc}(4, 2, 3)$ для произвольного шаблона $CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t)$, а в третьем – для случая, когда $CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t) = MMHD(4)$.

Таблица 4. Масштабирование двоичного шаблона $CRT_{tm}(4, 2, 3)$

Table 4. Scaling of binary template $CRT_{tm}(4, 2, 3)$

$CRT_{sc}(4, 2, 3)$	$CRT_{ou}(q_o, d_o, r_o)$	$CRT_{ou}(16, 4, 9)$ для $CRT_{tm}(4, 2, 3)$
0 0 0	$CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t) \ CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t) \ CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t)$	$T_0 = 000 \ 000 \ 000$ $T_1 = 011 \ 011 \ 011$ $T_2 = 110 \ 110 \ 110$ $T_3 = 101 \ 101 \ 101$
0 1 1	$CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t) \ \overline{CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t)} \ \overline{CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t)}$	$T_4 = 000 \ 111 \ 111$ $T_5 = 011 \ 100 \ 100$ $T_6 = 110 \ 001 \ 001$ $T_7 = 101 \ 010 \ 010$
1 0 1	$\overline{CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t)} \ CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t) \ \overline{CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t)}$	$T_8 = 111 \ 111 \ 000$ $T_9 = 100 \ 100 \ 011$ $T_{10} = 001 \ 001 \ 110$ $T_{11} = 010 \ 010 \ 101$
1 1 0	$\overline{CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t)} \ \overline{CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t)} \ CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t)$	$T_{12} = 111 \ 000 \ 111$ $T_{13} = 100 \ 011 \ 100$ $T_{14} = 001 \ 111 \ 001$ $T_{15} = 010 \ 101 \ 010$

Как видно из табл. 4, значения q_o и r_o теста $CRT_{ou}(q_o, d_o, r_o)$ увеличиваются соответственно в $q_s = 4$ и $r_s = 3$ по сравнению с величинами $q_t = 4$ и $r_t = 3$ масштабируемого шаблона. Более сложная зависимость наблюдается для порогового значения расстояния Хэмминга d_o , которое зависит как от вида масштабирующей матрицы, так и от масштабируемого шаблона.

Рассмотрим эту зависимость для случая, когда в качестве $CRT_{sc}(q_s, d_s, r_s)$ и $CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t)$ могут быть использованы произвольные двоичные матрицы, в том числе и управляемые вероятностные тесты. Кроме описания размерности этих матриц, числа их строк q и столбцов r , используем как пороговое расстояние Хэмминга, являющееся минимальным расстоянием $d = \min HD(T_i, T_j)$, так и максимальное расстояние Хэмминга $b = \max HD(T_i, T_j)$. Соответственно, для теста $CRT_{sc}(q_s, d_s, r_s)$ применим $b_s = \max HD(T_i, T_j)$, $i \neq j \in \{0, 1, \dots, q_s - 1\}$, а для $CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t)$ – значение $b_t = \max HD(T_i, T_j)$, $i \neq j \in \{0, 1, \dots, q_t - 1\}$. Для примера, приведенного в табл. 4, $b_s = d_s = 2$ и $b_t = d_t = 2$.

Для общего случая двухмерного масштабирования с целью получения управляемого вероятностного теста справедливо следующее утверждение.

Утверждение 2. Результатом масштабирования управляемого вероятностного теста $CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t)$ с помощью масштабирующего теста $CRT_{sc}(q_s, d_s, r_s)$ является тест $CRT(q_s \times q_t, d_o, r_s \times r_t)$, где $d_o = \min \{(r_s \times d_t), (r_t \times d_s), (r_s \times b_t + r_t \times b_s - 2 \times (b_s \times b_t))\}$.

Доказательство. Учитывая, что результирующий тест $CRT_{ou}(q_o, d_o, r_o)$ будет содержать $q_o = q_s \times q_t$ наборов, каждый из которых содержит $r_o = r_s \times r_t$ двоичных разрядов, в матричном представлении результатом масштабирования является матрица размерностью $(q_s \times q_t) \times (r_s \times r_t)$, в кото-

рой строки группируются в блоки, состоящие из q_t строк. Каждый из q_s блоков определяется строкой масштабирующей матрицы теста $CRT_{sc}(q_s, d_s, r_s)$, используемой для масштабирования, так, как это показано в табл. 4, где $q_s = q_t = 4$.

Рассмотрим значение величины порогового расстояния Хэмминга d_o между двумя произвольными строками теста $CRT_{ou}(q_o, d_o, r_o)$, полученного в результате масштабирования, представляющими собой два тестовых набора T_i и T_j , каждый из которых состоит из $r_s \times r_t$ двоичных значений. Указанные тестовые наборы T_i и T_j могут принадлежать как одному из q_s блоков, так и к разным блокам.

Структура каждого из q_s блока повторяет результат применения процедуры одномерного масштабирования, когда для увеличения разрядности используется повторение шаблона либо его инверсного представления. В этом случае сохраняется отношение значения порогового расстояния Хэмминга к разрядности наборов. Соответственно, если тестовые наборы принадлежат одному из q_s блоков строк, то для них $\min HD(T_i, T_j)$ определяется как $r_s \times d_t$ [10]. Здесь используется свойство расстояния Хэмминга, задаваемое равенством $HD(T_i, T_j) = HD(\bar{T}_i, \bar{T}_j)$.

Если тестовые наборы принадлежат различным блокам, тогда возможны два случая, а именно – эти наборы порождаются одинаковыми или разными наборами шаблона. Например, наборы T_0 и T_4 , приведенные в табл. 4, сформированы на базе одного набора 000 теста $CRT_{tm}(4, 2, 3)$, а T_0 и T_5 – на базе разных – 000 и 011. В первом случае $\min HD(T_i, T_j)$ вычисляется как $0 \times (r_s - d_s) + r_t \times d_s = r_t \times d_s$, что определяется свойством расстояния Хэмминга $HD(T_i, T_j) + HD(T_i, \bar{T}_j) = r$. Во втором случае для тестовых наборов масштабируемого теста $CRT_{tm}(q_t, d_t, r_t)$ применима зависимость расстояния Хэмминга $HD(T_i, T_j) = HD(\bar{T}_i, \bar{T}_j)$. Тогда минимальное значение расстояния Хэмминга между наборами будет определяться величинами максимальных расстояний b_t и b_s и вычисляться как $(r_s - b_s) \times b_t + b_s \times (r_t - b_t) = b_t \times r_s + b_s \times r_t - 2 \times (b_s \times b_t)$. Таким образом, пороговое значение d_o расстояния Хэмминга для результирующего теста $CRT_{ou}(q_o, d_o, r_o)$ определяется минимальной величиной из трех значений, а именно $-(r_s \times d_t), (r_t \times d_s)$ и $(b_t \times r_s + b_s \times r_t - 2 \times (b_s \times b_t))\}$. Что и требовалось доказать.

Наиболее сложной зависимостью характеризуется значение d_o результата масштабирования $CRT_{ou}(q_o, d_o, r_o)$, которое заметно упрощается при различных допущениях и ограничениях на характеристики шаблона и масштабирующей матрицы. Предположив, что и шаблон, и указанная матрица имеют одинаковых значения $r_s = r_t = r$ и $b_s = d_s = b_t = d_t = d$, что соответствует примеру в табл. 4, значение $d_o = \min\{(r_s \times d_t), (r_t \times d_s), (r_s \times b_t + r_t \times b_s - 2 \times (b_s \times b_t))\} = \min\{(r \times d), (r \times d), (r \times d + r \times d - 2 \times (d \times d))\}$, соответственно, если $d \leq r/2$, то $d_o = r \times d$, а для $d > r/2 - d_o = 2 \times d \times (r - d)$. Несложно убедиться, что расстояние Хэмминга $HD(T_i, T_j)$ между произвольными тестовыми наборами теста $CRT_{ou}(16, 4, 9)$ (табл. 4) не превышают порогового значения $d_o = 2 \times d \times (r - d) = 4$.

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что для произвольного шаблона такой же размерности $q_t \times r_t = 4 \times 3$, как и шаблон, использованный в табл. 4, но с произвольными значениями $d_t \geq 1$, величина порогового значения d_o принимает только значения 3 и 4. В то же время значения характеристик $aveHD(T_i, T_j)$ и $totalHD(T_i, T_j)$ (1) для $CRT_{ou}(q_o, d_o, r_o)$ во всех случаях принимает постоянную величину. Более того, использование шаблона, представляющего собой матрицу такой же размерности 4×3 , состоящую только из нулевых элементов, для которой $d_t = 0$, обеспечивало такое же значение $aveHD(T_i, T_j) = 4,8$, как и в остальных случаях. Это подтверждает значимость масштабирующей матрицы для обеспечения высоких характеристик результата масштабирования.

Заключение

1. Рассмотрен метод построения управляемых вероятностных тестов, основанный на двухмерном масштабировании исходного шаблона с помощью масштабирующей матрицы. Показано, что в качестве шаблона и матрицы могут использоваться управляемые вероятностные тесты с малым числом тестовых наборов и небольшой их разрядностью.

2. Получены данные, показывающие зависимость характеристик результата масштабирования от характеристик используемых масштабирующей матрицы и шаблона. Многообразие масштабирующих матриц и шаблонов, так же, как и большое количество их сочетаний, требуют последующих анализа и оценок.

3. Дальнейшие исследования целесообразно расширить в части свойств предложенного метода и его использования для различных задач тестового диагностирования вычислительных систем и их компонентов. Наиболее значимым представляется применение метода формирования управляемых вероятностных тестов для программного обеспечения.

Список литературы

1. Krupp, A. A Systematic Approach to the Test of Combined HW/SW Systems / A. Krupp, W. Muller // Proc. of IEEE Conference on the Testing and Automation of Embedded Systems, Dresden, Germany, Mar. 8–12, 2010. P. 323–326.
2. Arcuri, A. Random Testing: Theoretical Results and Practical Implications / A. Arcuri, M. Z. Iqbal, L. Briand // IEEE Transactions on Software Engineering. 2011. Vol. 38, No 2. P. 258–277.
3. Ярмолик, В. Н. Контроль и диагностика вычислительных систем / В. Н. Ярмолик. Минск: Бестпринт, 2019.
4. A Survey on Adaptive Random Testing / R. Huang [et al.] // IEEE Transactions on Software Engineering. 2021. Vol. 47, No 10. P. 2052–2083.
5. Adaptive Random Testing: The Art of Test Case Diversity / T. Y. Chen [et al.] // Journal of Systems and Software. 2010. Vol. 83. P. 60–66.
6. Управляемые вероятностные тесты с ограниченным значением расстояния Хэмминга / В. Н. Ярмолик [и др.] // Информатика. 2025. Т. 22, № 1. С. 7–26.
7. Ярмолик, В. Н. Построение управляемых вероятностных тестов с малым числом тестовых наборов / В. Н. Ярмолик, В. В. Петровская, Н. А. Шевченко // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 92–100. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-92-100>.
8. Plotkin, M. Binary Codes with Specified Minimum Distance / M. Plotkin // IRE Transactions on Information Theory. 1960. Vol. 6, No 4. P. 445–450.
9. MacWilliams, F. J. The Theory of Error-Correcting Codes / F. J. MacWilliams, N. J. A. Sloane. Netherland: Elsevier-North-Holland Pub. Co., 1977.
10. Ярмолик, В. Н. Масштабирование управляемых вероятностных тестов с применением матриц Адамара / В. Н. Ярмолик, Н. А. Шевченко, В. В. Петровская // Информатика. 2025. Т. 22, № 2. С. 63–80.
11. Mrozek, I. An Approach for Controlled Random Tests with a Given Hamming Distance Generation / I. Mrozek, M. Kopczewski, V. N. Yarmolik // Applied. Science. 2025. Vol. 15, No 18. <https://doi.org/10.3390/app15189951>.

Поступила 10.10.2025

Принята в печать 18.11.2025

References

1. Krupp A., Muller W. (2010) A Systematic Approach to the Test of Combined HW/SW Systems. *Proceedings of IEEE Conference on the Testing and Automation of Embedded Systems, Dresden, Germany, Mar. 8–12*. 323–326.
2. Arcuri A., Iqbal M. Z., Briand L. (2011) Random Testing: Theoretical Results and Practical Implications. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 38 (2), 258–277.
3. Yarmolik V. N. (2019) *Computer Systems Testing and Diagnoses*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
4. Huang R., Sun W., Xu Y., Chen H., Towey D., Xia X. (2021) A Survey on Adaptive Random Testing. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 47 (10), 2052–2083.
5. Chen T. Y., Kuo F. C., Merkel R. G., Tse N. H. (2010) Adaptive Random Testing: The Art of Test Case Diversity. *Journal of Systems and Software*. 83, 60–66.
6. Yarmolik V. N., Petrovskaya V. V., Demenkovets D. V., Levantsevich V. A. (2025) Controlled Random Tests with Fixed Minimal Hamming Distance. *Informatics*. 22 (1), 7–26 (in Russian).
7. Yarmolik V. N., Petrovskaya V. V., Shauchenka M. A. (2025) Constructing Controlled Random Tests with a Small Number of Test Patterns. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 92–100. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-92-100> (in Russian).
8. Plotkin M. (1960) Binary Codes with Specified Minimum Distance. *IRE Transactions on Information Theory*. 6 (4), 445–450.
9. MacWilliams F. J., Sloane N. J. A. (1977) *The Theory of Error-Correcting Codes*. Netherland, Elsevier-North-Holland Pub. Co.
10. Yarmolik V. N., Shauchenka M. A., Petrovskaya V. V. (2025) Scaling Controlled Random Tests Based on Hadamard Matrices. *Informatics*. 22 (2), 63–80 (in Russian).
11. Mrozek I., Kopczewski M., Yarmolik V. N. (2025) An Approach for Controlled Random Tests with a Given Hamming Distance Generation. *Applied. Science*. 15 (18). <https://doi.org/10.3390/app15189951>.

Received: 10 October 2025

Accepted: 18 November 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

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

Мрозек И., д-р, проф., Белостокский технический университет

Бранцевич П. Ю., д-р техн. наук, доц., проф. каф. программного обеспечения информационных технологий, БГУИР

Деменковец Д. В., магистр техн. наук, ст. преп. каф. программного обеспечения информационных технологий, БГУИР

Левантевич В. А., магистр техн. наук, ст. преп. каф. программного обеспечения информационных технологий, БГУИР

Адрес для корреспонденции

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

Information about the authors

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

Mrozek I., Doctor, Professor, Bialystok University of Technology

Brancevich P. Yu., Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Professor at the Department of Software and Information Technology, BSUIR

Demenkovets D. V., M. Sci. (Tech.), Senior Lecture at the Department of Software and Information Technology, BSUIR

Levantsevich V. A., M. Sci. (Tech.), Senior Lecture at the Department of Software and Information Technology, BSUIR

Address for correspondence

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



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-96-102>

УДК 004.934.2+534.784

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ БОКОВОГО АМИОТРОФИЧЕСКОГО СКЛЕРОЗА НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ГОЛОСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕКИ openSMILE

А. В. МИХНЕВИЧ, М. И. ВАШКЕВИЧ

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

Аннотация. Рассмотрена задача автоматического выявления признаков бокового амиотрофического склероза на основе анализа акустических характеристик голосового сигнала. Для извлечения функциональных акустических признаков голоса использовалась библиотека openSMILE с конфигурацией ComParE_2016. В качестве исходных данных использовались аудиозаписи из голосовой базы Minsk2020_ALS, включающей записи как здоровых пациентов, так и пациентов с боковым амиотрофическим склерозом. Проведены сравнение голосовых признаков между группами с использованием непараметрического критерия Манна – Уитни и FDR-коррекции множественных сравнений и раздельный анализ по полу. Выполнен эксперимент по классификации голосовых сигналов с использованием вложенной процедуры перекрестной проверки. Получены классификаторы, имеющие вероятность правильного обнаружения 75,0 % (для мужских голосов) и 74,2 % (для женских голосов). Выявлены статистически значимые акустические параметры, которые могут быть полезны в задачах автоматизированной диагностики и мониторинга бокового амиотрофического склероза.

Ключевые слова: боковой амиотрофический склероз, openSMILE, речевые признаки, акустический анализ, статистика, FDR-коррекция.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Михневич, А. В. Детектирование бокового амиотрофического склероза на основе акустического анализа голоса с использованием библиотеки openSMILE / А. В. Михневич, М. И. Вашкевич // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 96–102. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-96-102>.

DETECTION OF AMYOTROPHIC LATERAL SCLEROSIS BASED ON ACOUSTIC VOICE ANALYSIS USING THE openSMILE LIBRARY

ALEXANDRINA V. MIKHNEVICH, MAXIM I. VASHKEVICH

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

Abstract. This paper examines the problem of automatically detecting signs of amyotrophic lateral sclerosis based on the analysis of the acoustic characteristics of a voice signal. The openSMILE library with the ComParE_2016 configuration was used to extract functional acoustic features of the voice. Audio recordings from the Minsk2020_ALS voice database, which includes recordings of both healthy patients and patients with amyotrophic lateral sclerosis, were used as input. Voice features were compared between groups using the non-parametric Mann–Whitney test and FDR correction for multiple comparisons, with separate analysis by gender. An experiment on classifying voice signals was conducted using a nested cross-validation procedure. The resulting classifiers had a correct detection probability of 75.0 % (for male voices) and 74.2 % (for female voices). Statistically significant acoustic parameters that may be useful in automated diagnostics and monitoring of amyotrophic lateral sclerosis were identified.

Keywords: amyotrophic lateral sclerosis, openSMILE, speech features, acoustic analysis, statistics, FDR correction.

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

For citation. Mikhnevich A. V., Vashkevich M. I. (2025) Detection of Amyotrophic Lateral Sclerosis Based on Acoustic Voice Analysis Using the openSMILE Library. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 96–102. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-96-102> (in Russian).

Введение

Боковой амиотрофический склероз (БАС) – нейродегенеративное заболевание, которое поражает двигательные нейроны головного и спинного мозга, приводя к прогрессирующей мышечной слабости и нарушению двигательных функций. Одним из ранних симптомов БАС может быть изменение речевой функции, что делает голос важным биомаркером на ранних стадиях заболевания [1]. Автоматизированный анализ речи становится все более востребованным направлением в контексте скрининга, мониторинга и поддержки диагноза БАС [2, 3].

Несмотря на активное развитие методов машинного обучения, в частности, глубоких нейронных сетей, их применение в задаче детектирования БАС на основе речевого сигнала сталкивается с рядом ограничений. В [4, 5] подчеркивается, что нейросетевые подходы демонстрируют ограниченную эффективность при работе с малыми выборками и высокой вариативностью в данных, что является характерным для медицинских наборов речевых данных. Отмечается, что даже при использовании современных архитектур, таких как сверточные нейронные сети, результаты моделей зачастую не обладают достаточной обобщающей способностью.

Глубокие модели требуют значительного объема данных для обучения, что становится критичным при работе с редкими заболеваниями, такими как БАС. В дополнение к проблеме дефицита данных существенную роль играет интерпретируемость модели. Для реального применения важен не только корректный результат детектирования патологии, но и возможность установить, изменение каких именно характеристик голоса на него повлияло. В случае нейросетей такой интерпретируемости зачастую достичь сложно, поскольку они функционируют как черный ящик.

Альтернативой акустическим методам анализа речи являются подходы, основанные на применении кинематических сенсоров, таких как электромагнитная артикулография [6]. Эти методы позволяют регистрировать движения языка и губ с высокой точностью и применяются в клинических исследованиях нарушений речи. Однако использование таких технологий требует дорогостоящего оборудования, проведения обследования в лабораторных условиях. Это существенно ограничивает их применимость в массовой диагностике и регулярном мониторинге.

В статье рассмотрена возможность построения системы детектирования БАС на основе акустического анализа голосового сигнала. Методологическая основа исследования включает три этапа. Во-первых, для извлечения акустических признаков применяется библиотека openSMILE [7], обеспечивающая комплексное описание речевого сигнала при помощи стандартизированного набора параметров и доказавшая свою эффективность в задачах медицинской диагностики [8]. Во-вторых, анализ голосового сигнала проводится раздельно для мужской и женской групп, что позволяет учесть физиологические различия в строении голосового аппарата и минимизировать вариативность в данных. В-третьих, для детектирования используются интерпретируемые статистические классификаторы, которые дают возможность идентифицировать наиболее значимые диагностические признаки.

Описание базы голосов

Использовалась база данных Minsk_ALS_2020 [9], содержащая записи устойчивого произнесения гласных «а» и «и», собранная в Республиканском научно-практическом центре неврологии и нейрохирургии (Минск). Выборка включала 64 диктора (31 БАС, 33 группы контроля) и содержала 128 аудиозаписей. Группа БАС включала 17 мужчин ($(61,1 \pm 7,7)$ лет) и 14 женщин ($(57,3 \pm 7,8)$ лет). Контрольная группа включала 13 мужчин ($(50,2 \pm 13,8)$ лет) и 20 женщин ($(56,1 \pm 9,7)$ лет). Протокол записи предусматривал произнесение гласных на комфортной высоте и громкости с максимальной продолжительностью. Все записи были стандартизированы по длительности и приведены к единому формату (wav, 44,1 кГц). Аудиоматериалы и метаданные доступны в репозитории проекта на GitHub [10].

В качестве иллюстрации на рис. 1 приведен вид аудиосигналов из рассматриваемой базы во временной и мел-частотной областях.

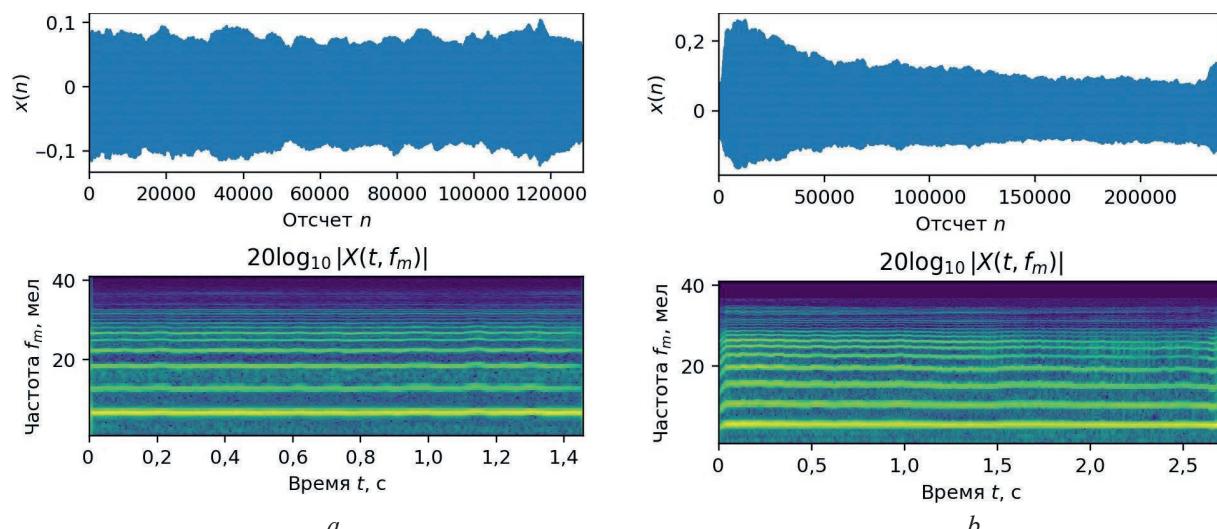


Рис. 1. Пример записей женских голосов из базы Minsk_ALS_2020 по возрасту:
 а – 64 года (группа контроля); б – 55 лет (пациентка с боковым амиотрофическим склерозом)
Fig. 1. Example of female voice recordings from the Minsk_ALS_2020 database by age:
 a – 64 years old (control group); b – 55 years old (patient with amyotrophic lateral sclerosis)

Приведенные на рис. 1 сигналы, несмотря на внешнее сходство, имеют различную динамику частотных компонент, которые позволяют отличить голос человека в норме и при патологии.

Извлечение признаков и статистический анализ

Анализ акустических признаков голосовых сигналов проводили с помощью программной библиотеки openSMILE (open-source Speech and Music Interpretation by Large-Space Extraction) [7], представляющей собой один из наиболее широко используемых инструментов в задачах автоматического анализа речи. Данная библиотека – это гибкий и модульный фреймворк для извлечения широкого спектра параметров речи, включая мел-частотные кепстральные коэффициенты (МЧКК), амплитудный и модуляционный спектры, а также статистические характеристики, вычисленные на основе данных первичных параметров.

В исследовании применялась конфигурация ComParE_2016, входящая в стандартный набор openSMILE и ориентированная на извлечение надсегментных признаков. Общее число извлекаемых признаков составило 6373. На этапе статистического анализа для каждого признака проводилось сравнение между группой контроля и БАС с использованием непараметрического U-критерия Манна – Уитни, поскольку распределения признаков не удовлетворяли требованиям нормальности. Для учета эффекта множественных сравнений применялась коррекция полученных p -значений по методу Бенджамина – Хохберга ($q \leq 0,05$). В табл. 1 приведены наиболее значимые признаки, найденные для групп мужчин и женщин.

Таблица 1. Наиболее значимые речевые признаки
Table 1. The most significant speech features

Пол	Название признака	p -значение
Женский	mfcc_sma[9]_minSegLen	8,6245e-05
	audSpec_Rfilt_sma[16]_minSegLen	2,9027e-04
	pcm_fftMag_spectralSlope_sma_risetime	3,2555e-04
	audSpec_Rfilt_sma[22]_minSegLen	3,3778e-04
	mfcc_sma_de[4]_minSegLen	3,5855e-04
Мужской	audSpec_Rfilt_sma[15]_range	4,9817e-04
	audSpec_Rfilt_sma_de[17]_range	4,9817e-04
	audSpec_Rfilt_sma[17]_lpc0	4,9817e-04
	audSpec_Rfilt_sma[7]_lpc1	4,9817e-04
	audSpec_Rfilt_sma[7]_stddevRisingSlope	5,7128e-04

Следует заметить, что ни один признак не прошел проверку на статическую значимость после коррекции Бенджамини – Хохберга. С другой стороны, признаки имеют p -значения менее 0,001, что указывает на существенные различия между анализируемыми группами. Из табл. 1 видно, что признаки в двух группах отличаются. Это говорит об акустических различиях речевого тракта у мужчин и женщин. Признак `mfcc_sma[9]_minSegLen`, например, измеряет минимальную продолжительность сегмента, в котором (сглаженный) девятый коэффициент МЧКК остается выше определенного порога. Низкое значение $p = 8,6\text{e-}05$ указывает на статистически значимую разницу между сравниваемыми группами по стабильности среднего спектрального контура в области среднего мел-диапазона.

На рис. 2 представлена ящиковая диаграмма признака `pcm_fftMag_spectralSlope_sma_risetime`, отражающего время нарастания (англ. *rise time*) спектрального наклона (англ. *spectral slope*) до 50 % от максимальной величины. Значение $p = 3,26\text{e-}04$ для данного признака указывает на существенные различия в темпах формирования спектрального наклона в группе женских голосов.

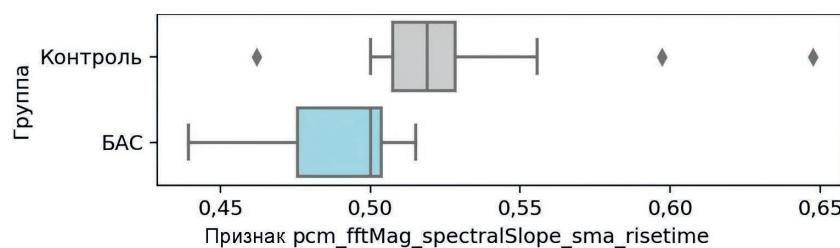


Рис. 2. Ящиковая диаграмма признака `pcm_fftMag_spectralSlope_sma_risetime`
Fig. 2. Boxplot of `pcm_fftMag_spectralSlope_sma_risetime` feature

Следует отметить, что обе группы включают признаки из группы `audSpec_Rfilt`, которые вычисляются на основе модуляционного спектра и RASTA-фильтрации [11]. Таким образом, можно сделать обобщающий вывод, что различия голосов в анализируемых группах проявляются в спектротемпоральной области.

Полученные на первом этапе признаки были стандартизированы ($\mu = 0, \sigma = 1$) для выполнения экспериментов с классификацией набора данных. Для тестирования были выбраны четыре базовых классификатора, которые хорошо себя зарекомендовали в задачах детектирования патологий по речи [2]: машина опорных векторов (МОВ) с линейным ядром, МОВ с радиальным ядром [12], линейный дискриминантный анализ (ЛДА) [9] и деревья решений [12]. Оценка производительности классификаторов выполнялась при помощи вложенной перекрестной проверки, внешний цикл которой использовался для расчета правильности классификатора, а внутренний – для подбора параметров классификатора (в частности, для определения оптимального числа признаков).

Результаты исследований и их обсуждение

Для мужской группы голосов наилучшую производительность показал классификатор на основе деревьев решений, его вероятность правильного обнаружения составила 75,0 %, для женской – наилучший результат у классификатора на основе ЛДА со схожей вероятностью правильного обнаружения – 74,2 % (рис. 3). Оба классификатора значительно превосходят классификатор на основе случайного выбора, который для бинарной классификации имеет вероятность правильного обнаружения 50 %. Ширина доверительных интервалов (ДИ) примерно одинакова, что указывает на сопоставимую надежность полученных оценок правильности. В целом полученные результаты демонстрируют эффективность речевых признаков для детектирования БАС.

Дополнительно были проанализированы признаки, которые имели наибольшую информативность, т. е. чаще всего отбирались для формирования классификатора. Для классификации мужских голосов наибольшую значимость имел признак `audSpec_Rfilt_sma[17]_lpc2`. Согласно принципам именования библиотеки `openSMILE`, префикс `audSpec_Rfilt` указывает, что признак получен на основе энергии узкополосного спектра (вычисленного в критических полосах слуха) после RASTA-фильтрации; 17 означает 17-ю полосу спектра; `sma` (англ. *simple moving average*) – сглаживание простым скользящим средним по кадрам; `lpc2` – второй коэффициент линейного предсказания, рассчитанный для 17-й полосы. На рис. 4, *a* приведена ящиковая диаграмма этого признака.

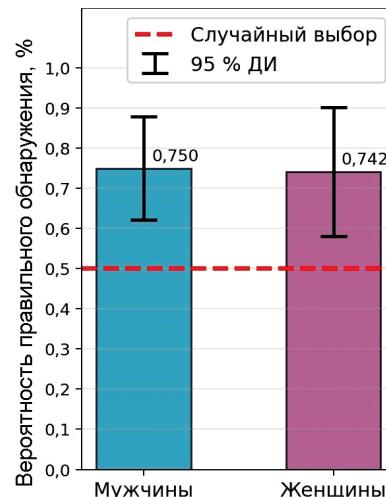


Рис. 3. Производительность классификаторов для мужских и женских голосов
Fig. 3. Classification performance for male and female voices

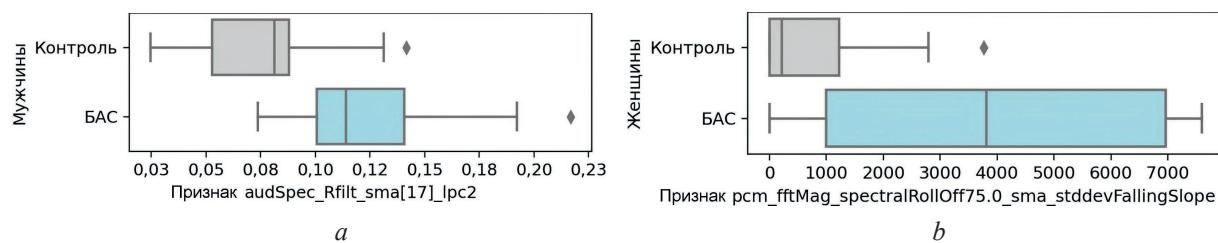


Рис. 4. Ящиковыe диаграммы наиболее информативных речевых признаков для групп:
a – мужчин; **b** – женщин
Fig. 4. Box plots of the most informative speech features for groups: *a* – men; *b* – women

Высокое абсолютное значение lpc2 (рис. 4, *a*) указывает на выраженные «изломы» модуляционного спектра в 17-й полосе, что отражает нестабильную динамику тембра голоса. Нужно учесть, что анализируются именно записи устойчивой фонации звука «а», и в идеальном случае колебания в модуляционном спектре должны быть минимальными. Низкое значение lpc2 говорит о более однородном распределении энергии в полосе (без ярко выраженных пиков) – это признак ровного звучания, который характерен для здоровых голосов. Ящиковая диаграмма на рис. 4, *a* подтверждает приведенные выше рассуждения: у пациентов с БАС признак audSpec_Rfilt_sma[17]_lpc2 имеет более высокое значение, чем в группе контроля.

Для классификации женских голосов наибольшую значимость имел признак pcm_fftMag_spectralRollOff75.0_sma_stddevFallingSlope (рис. 4, *b*). В данном случае pcm_fftMag указывает, что признак вычислялся на основе амплитудного спектра сигнала; spectralRollOff75 – это частота, ниже которой сосредоточено 75 % общей энергии спектра; stddevFallingSlope – стандартное отклонение углов наклона на тех сегментах, где признак убывает. Из ящиковской диаграммы на рис. 4, *b* можно видеть, что у пациентов с БАС значение данного признака значительно выше, чем в группе контроля. В целом высокое значение этого признака говорит о нерегулярности и резких изменениях в движении границы 75 % энергии: в областях спада энергия спектра быстро «скатывается» вниз. Низкое stddevFallingSlope-значение, наоборот, указывает на плавный спад частотной границы 75 % энергии и является характеристикой ровного, спокойного голоса.

Полученные результаты также находятся в согласии с ранее опубликованными данными. Так, в [2], где библиотека openSMILE тоже использовалась для решения задачи детектирования голосов пациентов с БАС, было выявлено, что признак audSpec_Rfilt_sma[19]_lpc4 входит в список наиболее значимых признаков для анализа мужских голосов. Помимо этого, среди наиболее информативных признаков в [2] выделен audSpec_Rfilt_sma[10]_maxPos. В целом можно сделать обобщающий вывод, что признаки, полученные на основе анализа спектра, вычисленного в критических полосах, с использованием RASTA-фильтрации имеют существенное значение для решения задачи детектирования БАС с использованием акустического анализа.

Заключение

1. Проведено исследование применимости признаков, вычисляемых библиотекой openSMILE, для задачи детектирования голосов пациентов с боковым амиотрофическим склерозом с использованием набора данных, собранных при помощи смартфона. Анализ и классификация голосовых сигналов выполнялись с учетом пола. Для мужской группы голосов лучшую производительность показал классификатор на основе деревьев решений (75,0 % правильных результатов). Для женской группы голосов наилучший результат у классификатора на основе линейного дискриминантного анализа (74,2 % правильных результатов). Полученные показатели вероятности правильного обнаружения оставляют большое пространство для улучшения. Это можно объяснить тем, что библиотека openSMILE является универсальным средством извлечения речевых признаков и не учитывает специфику конкретной голосовой патологии.

2. Важным практическим результатом исследования является установление доминирующей роли признаков, вычисляемых на основе модуляционного спектра сигнала (RASTA-фильтрация) в задаче детектирования бокового амиотрофического склероза. Полученные данные позволяют предположить, что целенаправленное проектирование признакового пространства на основе анализа модуляционных спектра может существенно повысить эффективность автоматизированных систем детектирования бокового амиотрофического склероза по речевым сигналам.

Список литературы / References

1. Bowden M., Beswick E., Tam J., Perry D., Smith A., Newton J., et al. (2023) A Systematic Review and Narrative Analysis of Digital Speech Biomarkers in Motor Neuron Disease. *NPJ Digital Medicine*. 6 (1), 1–19.
2. Norel R., Pietrowicz M., Agurto C., Rishoni S., Cecchi G. (2018) Detection of Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS) Via Acoustic Analysis. *Proceedings of the Annual Conference of the International Speech Communication Association (INTERSPEECH)*. 377–381.
3. Folgado D., Rocha P. S., Matias P., Liebeatrau D., Nunes F., Rocha T., et al. (2025) HomeSenseALS: A Mobile Sensing and Self-Monitoring System to Monitor Patients with ALS in Everyday Life. *ACM Transactions on Computing for Healthcare*. 25 (3), 1–32.
4. An K., Kim M., Teplansky K., Green J., Campbell T., Yunusova Y., et al. (2018) Automatic Early Detection of Amyotrophic Lateral Sclerosis from Intelligible Speech Using Convolutional Neural Networks. *Proceedings of Interspeech*. 1913–1917.
5. Illa A., Patel D., Yamini B. K., Veeramani P.-K., Polavarapu K., Nashi S., et al. (2018) Comparison of Speech Tasks for Automatic Classification of Patients with Amyotrophic Lateral Sclerosis and Healthy Subjects. *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 6014–6018.
6. Yunusova Y., Green J. R., Greenwood L., Wang J., Pattee G. L., Zinman L. (2012) Tongue Movements and Their Acoustic Consequences in Amyotrophic Lateral Sclerosis. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 55 (3), 673–687.
7. Eyben F., Wöllmer M., Schuller B. (2010) openSMILE: The Munich Versatile and Fast Open-Source Audio Feature Extractor. *Proceedings of the 18th ACM International Conference on Multimedia*. 1459–1462.
8. Bocklet T., Steidl S., Nöth E., Skodda S. (2013) Automatic Evaluation of Parkinson’s Speech-Acoustic, Prosodic and Voice-Related Cues. *Proceedings of Interspeech*. 1149–1153.
9. Vashkevich M., Rushkevich Yu. (2021) Classification of ALS Patients Based on Acoustic Analysis of Sustained Vowel Phonations. *Biomedical Signal Processing and Control*. 65, 1–14.
10. Minsk2020_ALS_database: Classification of ALS Patients Based on Acoustic Analysis of Sustained Vowel Phonations. *GitHub*. Available: https://github.com/Mak-Sim/Minsk2020_ALS_database (Accessed 6 October 2025).
11. Hermansky H., Morgan N. (1994) RASTA Processing of Speech. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*. 2 (4), 578–589.
12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. H. (2009) The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. *Springer*.

Поступила 10.10.2025

Принята в печать 18.11.2025

Received: 10 October 2025

Accepted: 18 November 2025

Вклад авторов

Михневич А. В. осуществила извлечение признаков с использованием библиотеки openSMILE, провела статистический анализ полученных результатов, выполнила эксперименты по классификации голосовых сигналов. Участвовала в обсуждении результатов и подготовке текста статьи.

Вашкевич М. И. разработал концепцию исследования, определил методику анализа акустических признаков, участвовал в интерпретации результатов и подготовке текста статьи.

Authors' contribution

Mikhnevich A. V. performed feature extraction using the openSMILE library, conducted statistical analysis of the results, and performed experiments on voice signal classification. Participated in the discussion of the results and the preparation of the article.

Vashkevich M. I. developed the study concept, defined the acoustic feature analysis methodology, and participated in the interpretation of the results and the preparation of the article.

Сведения об авторах

Михневич А. В., 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 17 293-84-78
E-mail: vashkevich@bsuir.by
Вашкевич Максим Иосифович

Information about the authors

Mikhnevich A. V., Postgraduate at the Department of Electronic Computing Facilities, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Vashkevich M. I., Dr. Sci. (Tech.), Professor at the Department of Electronic Computing Facilities, 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 17 293-84-78
E-mail: vashkevich@bsuir.by
Vashkevich Maxim Iosifovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-103-109>

УДК 004.8: 616.441

МНОГОМАСШТАБНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ФРАГМЕНТОВ ГИСТОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. А. КОСАРЕВА

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

*Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларусь
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. В статье представлена архитектура многомасштабной нейронной сети с несколькими входами, предназначенная для одновременной обработки групп фрагментов гистологических изображений, полученных при различных увеличениях. Предлагаемая модель интегрирует признаки на уровне скрытых слоев, что позволяет эффективно объединять информацию о тканевой структуре на разных масштабах детализации. Экспериментальные результаты показали, что применение трех уровней увеличения по одной стороне фрагмента (98,58; 197,16 и 394,32 мкм) обеспечивает оптимальный баланс между информативностью входных данных и устойчивостью модели. Использование архитектуры позволило повысить среднее значение F1-меры на 5 % по сравнению с одношкольным подходом, достигнув величины $0,8962 \pm 0,0508$, а в отдельных запусках – 0,9697. Наблюданное стандартное отклонение обусловлено не нестабильностью модели, а естественной вариабельностью медицинских данных в ходе формирования обучающих выборок. Полученные результаты подтверждают перспективность многомасштабного анализа для задач цифровой патологии и демонстрируют потенциал предложенного решения в качестве средства автоматизированного выделения подозрительных участков на полнослайдовых изображениях.

Ключевые слова: многомасштабная нейронная сеть, глубокое обучение, гистопатологические изображения, полнослайдовые изображения, искусственный интеллект в медицине.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Косарева, А. А. Многомасштабная нейронная сеть для классификации фрагментов гистологических изображений / А. А. Косарева // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 103–109. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-103-109>.

MULTI-SCALE NEURAL NETWORK FOR CLASSIFICATION OF HISTOLOGICAL IMAGE FRAGMENTS

ALEKSANDRA A. KOSAREVA

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)
The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. This paper presents the architecture of a multi-scale, multi-input neural network for simultaneously processing groups of histological image fragments acquired at different magnifications. The proposed model integrates features at the hidden layer level, which allows for efficient fusion of tissue structure information at different detail scales. Experimental results have shown that applying three magnification levels on one side of a fragment (98.58; 197.16, and 394.32 μm) provides an optimal balance between the information content of the input data and the stability of the model. Using this architecture, the average F1-score increased by 5 % compared to a single-scale approach, reaching a value of 0.8962 ± 0.0508 , and in some runs – 0.9697. The observed standard deviation is due to the natural variability of medical data during the formation of training samples, rather than

to model instability. The obtained results confirm the promise of multiscale analysis for digital pathology tasks and demonstrate the potential of the proposed solution as a means of automated detection of suspicious areas in full-slide images.

Keywords: multi-scale neural network, deep learning, histopathological images, full-slide images, artificial intelligence in medicine.

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

For citation. Kosareva A. A. (2025) Multi-Scale Neural Network for Classification of Histological Image Fragments. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 103–109. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-103-109> (in Russian).

Введение

При анализе гистологических изображений диагностически значимые признаки проявляются на разных уровнях увеличения. Так, изображения с низким увеличением позволяют оценить общую архитектуру тканей и пространственное расположение патологических очагов, тогда как высокое увеличение дает возможность рассмотреть детали клеточного строения и морфологические особенности отдельных структур. Использование только одного масштаба может привести к утрате важной информации и ухудшению качества анализа.

Современные исследования в области цифровой патологии демонстрируют значительный прогресс в применении многомасштабных нейронных сетей для анализа гистопатологических изображений. Основная сложность заключается в высокой вариабельности морфологических признаков, перекрытии клеток и неоднородности окрашивания, что делает традиционные подходы недостаточно эффективными. Многомасштабные архитектуры позволяют преодолеть эти ограничения за счет интеграции информации из различных уровней детализации.

Одно из ключевых направлений – использование многомасштабного слияния признаков для повышения точности обнаружения малых объектов. В [1] показано, что комбинация алгоритма SSD с добавлением многомасштабного слияния признаков позволяет значительно улучшить детектирование мелких и средних объектов в условиях изменчивого освещения и угла обзора. Несмотря на уменьшение скорости обработки по сравнению с базовой версией SSD, достигается оптимальный баланс между точностью и производительностью, превосходя алгоритм Faster R-CNN по скорости при сохранении высокой чувствительности.

Альтернативный вариант использования многомасштабных признаков предложен в [2], где рассмотрена многомасштабная унифицированная сеть. Архитектура разделяет поверхностные слои на многомасштабные подсети для извлечения признаков из входных данных различного масштаба, затем объединяет низкоуровневые признаки в глубокие слои для формирования высокоуровневых семантических представлений. Введение масштабно-инвариантного ограничения обеспечивает согласованность признаков при разных масштабах, что позволяет повысить точность классификации до 44,53 % для входных изображений размером 32×32.

Для решения задачи сегментации папиллярного рака щитовидной железы (ПРЩЖ, Multi-Scale Adaptive Convolutional (MSAC)) в [3] предложены специализированные архитектуры MSAC-DBUNet и MSAC-DD с двойными декодерами. Эти сети используют адаптивную свертку на разных масштабах, что позволяет более точно выделять ядерные характеристики, являющиеся ключевыми для диагностики ПРЩЖ. Эксперименты показали, что MSAC-DD обеспечивает сопоставимую с MSAC-DBUNet точность при существенном сокращении времени вычислений и потребления GPU-ресурсов.

Отдельное внимание в статьях, посвященных использованию многомасштабных признаков, уделяется автоматическому обнаружению ядер клеток. Подход, предложенный в [4], основан на полностью сверточных сетях с многомасштабной регрессией плотностной карты. Архитектура без полностью связанных слоев позволяет обрабатывать изображения произвольного размера, а использование морфологических операций и фильтров повышает надежность локализации центров клеток. На тестовых наборах достигнуты впечатляющие результаты: F1-мера составляла 0,9924 для флуоресцентных микроскопических изображений и 0,8440 – для гистопатологических срезов молочной железы.

Таким образом, современные многомасштабные архитектуры демонстрируют значительный потенциал в анализе гистопатологических изображений папиллярного рака. Их основное преиму-

щество заключается в способности интегрировать информацию из различных пространственных масштабов, в частности, при выявлении характерных ядерных аномалий при ПРИЩЖ.

Целью представленного в статье исследования являлась разработка архитектуры многомасштабной нейронной сети с несколькими входами для одновременной обработки групп гистологических изображений, полученных на различных уровнях увеличения, с последующим объединением признаков на уровне скрытых слоев.

Материалы и методы исследований

В качестве данных для обучения нейронных сетей использовался набор фрагментов гистопатологических изображений папиллярного рака, описанный в [5]. Набор данных был разделен на два класса: класс нормальной ткани и класс фрагментов изображений с наличием признаков папиллярного рака. Во второй класс вошли фрагменты, соответствующие разметке папиллярной, фолликулярной, солидной архитектоники рака. При обучении нейронных сетей учитывался индивидуальный идентификатор пациента, позволяющий исключать попадание фрагментов одного пациента одновременно в обучающую, валидационную или тестовую выборку. Размер фрагментов на входе сети составлял 224×224 пикселя. Были сформированы четыре набора, каждый из которых содержал фрагменты определенного увеличения по одной стороне фрагмента (49,29; 98,58; 197,16 и 394,32 мкм) (рис. 1).

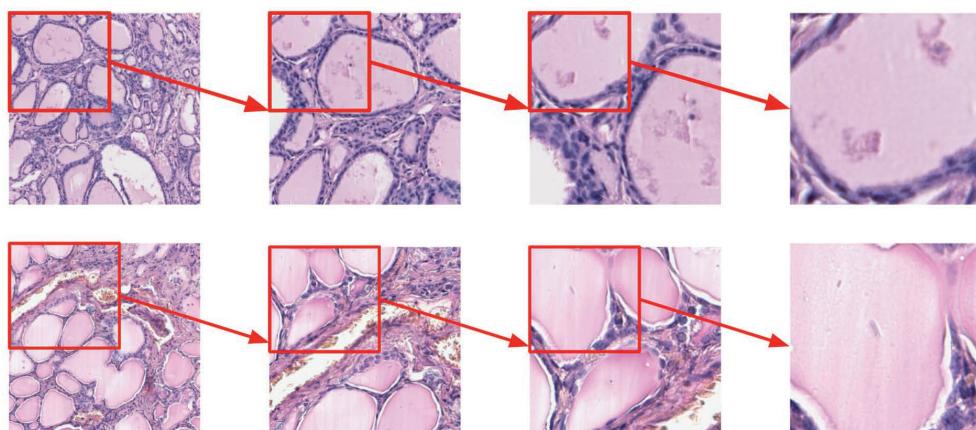


Рис. 1. Примеры сформированных групп фрагментов изображений разного увеличения
Fig. 1. Examples of formed groups of image fragments at different magnifications

Фрагменты изображений нарезались с привязкой к левому верхнему углу размеченного полигона. Такой подход был выбран с учетом особенностей реализованного скрипта обработки полнослайдовых изображений, а также для обеспечения строгого соответствия между фрагментом и его истинной морфологической принадлежностью. Учитывая значительную вариабельность размеров и формы областей разметки (от мелких очагов до крупных протяженных структур), выбор любой другой опорной точки (например, центра или другого угла) мог привести к тому, что один фрагмент частично перекрывал бы зоны с различными типами тканей. Это создало бы неоднозначность в разметке и исказило бы обучающую выборку, снижая качество обучения модели.

При обучении все фрагменты изображений аугментировались с использованием:

- геометрических трансформаций (отражения, повороты);
- трансформаций цвета (размытие, изменение контрастности и яркости, случайное удаление части изображения).

Всего набор данных включал 7244 группы фрагментов изображения нормальной ткани и 10 469 фрагментов изображений ткани, содержащей признаки наличия раковых опухолей. При обучении выборка формировалась сбалансированно по классам с ограничением размера каждого класса количеством фрагментов наименьшего класса, что обеспечивало равномерное представление всех категорий в процессе обучения.

В ходе исследований была разработана архитектура многомасштабной нейронной сети, реализован скрипт, позволяющий динамически выбирать количество входов нейронной сети

при обучении. Изображение с каждого входа проходило через сверточную нейронную сеть, после поступало на блок Cross-Scale Attention, основанный на слое multi-head attention [6]. Данный блок играл ключевую роль в интеграции информации между разными уровнями увеличения: он позволил модели адаптивно обмениваться признаками между низко- и высокомасштабными представлениями одного и того же изображения. Результаты, полученные для каждого из уровней увеличения, объединялись с исходными признаками через остаточный блок, что предотвращало потерю полезной информации и способствовало стабильности обучения. Далее применялась нормализация активации по каждому образцу, ускоряя сходимость и повышая устойчивость к колебаниям в данных. После данные конкатенировались и поступали на классификатор, в качестве которого выступала простая двухслойная полно связная нейронная сеть.

В качестве сверточных блоков предлагаемой архитектуры использовалась модель EfficientNetB0 [7]. Ее выбор был обусловлен как результатами предыдущих исследований, так и наличием уже проведенных экспериментов на рассмотренном наборе данных с использованием одношкольного подхода. Это позволило обеспечить корректное сравнение и оценку вклада многомасштабной стратегии за счет использования ранее полученного опорного результата. На рис. 2 представлена архитектура разработанной многомасштабной нейронной сети.

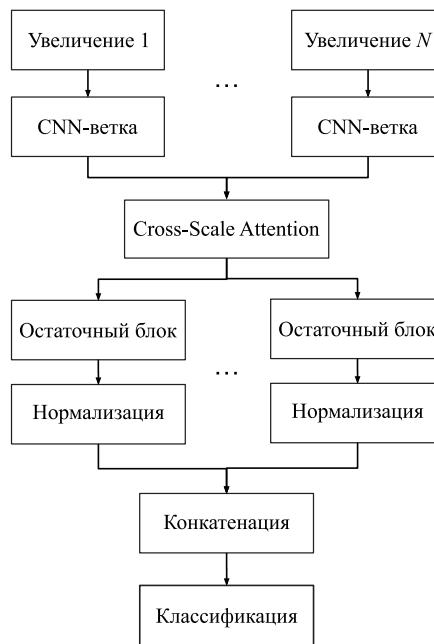


Рис. 2. Предлагаемая архитектура многомасштабной нейронной сети
Fig. 2. Proposed architecture of the multi-scale neural network

Нейронные сети с разным количеством входов обучались пять раз, и каждый раз класс наличия признаков папиллярного рака формировался случайным образом для обеспечения сбалансированности классов. Фрагменты изображений случайно перемешивались между выборками, исключая попадания в разные выборки фрагментов изображений одного пациента.

При обучении модели использовались следующие ключевые гиперпараметры: размер батча был равен 25, начальная скорость обучения составляла 10^{-5} с циклическим планировщиком (OneCycleLR) и максимальным значением 3×10^{-4} . Оптимизация проводилась с помощью оптимизатора Adam с применением обрезки градиентов по норме. Ранняя остановка осуществлялась по макроусредненной F1-мере на валидационной выборке при отсутствии улучшений в течение 15 эпох. Реализованный скрипт с подробным описанием можно найти на GitHub в репозитории по ссылке [8].

Результаты исследований и их обсуждение

В табл. 1 приведены усредненные результаты обучения по пяти экспериментам для нейронных сетей с разным количеством входов увеличения. При одном входе использовалась оригинальная

нейронная сеть EfficientNetB0, в качестве метрики для сравнения – средняя мера F1, рассчитанная по результатам бинарной классификации изображений тестового набора данных ($mean \pm std$).

Таблица 1. Усредненные результаты обучения многомасштабной нейронной сети с разным количеством входов

Table 1. Average results of training a multiscale neural network with different numbers of inputs

Количество входов нейронной сети	Размер изображения по одной стороне фрагмента, мкм	Средняя мера F1
Два входа	197,16 и 394,32	$0,8850 \pm 0,0526$
Три входа	98,58; 197,16 и 394,32	$0,8962 \pm 0,0508$
Четыре входа	49,29; 98,58; 197,16 и 394,32	$0,8695 \pm 0,0504$
Один вход	394,32	$0,8481 \pm 0,0404$

Наблюдаемое стандартное отклонение значений F1-меры отражает естественную вариабельность гистопатологических изображений, присущую разным подвыборкам данных. Примеры разнообразия фрагментов изображений, влияющих на колебание F1-меры в ходе формирования обучающих выборок, приведены на рис. 3. Поскольку разбиение на обучающую, валидационную и тестовую выборки проводилось случайным образом, состав каждой обучающей и валидационной подгруппы мог существенно различаться по доминирующему морфологическим паттернам, степени неоднородности окрашивания (рис. 3, a) и по внутриклассовому разнообразию (рис. 3, b). Это приводило к колебаниям метрик качества между запусками даже при одинаковой архитектуре и настройках обучения. Таким образом, высокое стандартное отклонение обусловлено не нестабильностью модели, а гетерогенностью данных – характерной особенностью медицинских изображений. Схожий характер изменения F1-меры во всех экспериментах подтверждает устойчивость поведения модели, несмотря на разнообразие входных данных.

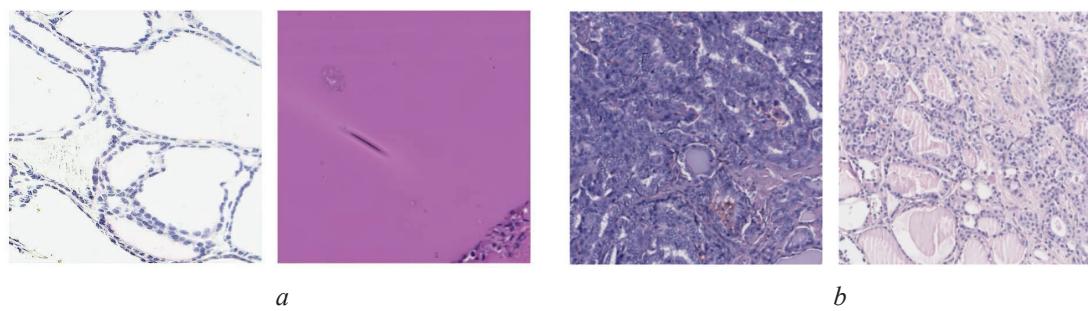


Рис. 3. Примеры разнообразия фрагментов изображений:

a – нормальной ткани одного уровня увеличения разной степени окрашивания;
b – разной архитектоники рака, относящегося к одному классу

Fig. 3. Examples of the diversity of image fragments: *a* – normal tissue at the same magnification level with varying degrees of staining; *b* – different architecture of cancer belonging to the same class

Проведенное исследование подтвердило высокую воспроизводимость результатов: предыдущий эксперимент с обучением модели EfficientNetB0 [6] был успешно воспроизведен в альтернативном программном окружении и с использованием иных технологий подготовки данных, что свидетельствует о надежности полученных ранее результатов. Применение многомасштабной архитектуры позволило достичь значимого улучшения качества классификации. Среднее значение F1-меры при использовании многомасштабной архитектуры возросло для всех рассмотренных конфигураций количества входов по сравнению с одношкольным подходом. Наилучшие показатели были достигнуты для модели с тремя входами разного увеличения, что обеспечило наиболее полное представление морфологических признаков на различных уровнях детализации (увеличение средней меры F1 на 5 % по сравнению с одномасштабным походом). Данная конфигурация продемонстрировала среднюю метрику F1-меры на уровне $0,8962 \pm 0,0508$, а в отдельных запусках достигла значения 0,9697.

Несмотря на то что в предыдущих исследованиях увеличение масштаба фрагментов при обучении бинарных классификаторов приводило к снижению качества классификации моделью EfficientNetB0 (F1-мера = 0,66 для фрагмента 49,29 мкм по одной стороне, 0,68 – для 98,58 мкм,

0,70 – для 197 мкм и 0,83 – для 394,32 мкм) [6], в данной статье продемонстрирован противоположный эффект. При применении многомасштабной архитектуры три уровня увеличения 98,58; 197,16 и 394,32 мкм вносили положительный вклад в финальное качество классификации, обеспечивая более полное и устойчивое представление морфологических признаков за счет интеграции информации на разных уровнях детализации.

Одним из недостатков предлагаемого подхода являлся способ подготовки набора данных. Выбор левого угла при формировании групп увеличений был обусловлен спецификой реализованного скрипта и разметки. При выборе опорной точки в правом нижнем углу размеченной области фрагмент с более высоким увеличением был бы извлечен из соответствующей зоны в правой части изображения. Таким образом удавалось избегать попадания в фрагмент увеличенной области, содержащей ткани другого класса. В рамках тестирования многомасштабной архитектуры такого подхода было достаточно.

Более перспективным подходом могло бы стать формирование последовательности фрагментов, соответствующих требуемым уровням увеличения. Однако в рамках данного исследования был сознательно выбран упрощенный подход, основанный на стандартной архитектуре EfficientNetB0 без модификации ее внутренней структуры, имеющей строгое ограничение по размеру входа ($224 \times 224 \times 3$). Такой выбор обусловлен необходимостью обеспечить четкое и недвусмысленное понимание влияния многомасштабного представления данных на качество классификации. Использование немодифицированной, широко распространенной базовой архитектуры позволило изолировать эффект интеграции информации с разных масштабов от возможных искажений, вносимых изменениями в топологию сети, что способствует более объективной оценке вклада многомасштабного анализа.

Заключение

1. Интеграция информации из трех масштабов оказалась оптимальной стратегией, балансирующей между информативностью входных данных и устойчивостью модели, и может служить основой для дальнейшего развития систем автоматизированного анализа гистопатологических изображений. Применение разработанной архитектуры, интегрирующей данные с трех различных уровней увеличения, позволило повысить среднюю F1-меру на 5 % по сравнению с одношкольным подходом, что подтверждает важность комплексного анализа тканевой структуры на разных масштабах детализации. Наиболее высокие показатели качества были достигнуты при использовании фрагментов размерами 98,58; 197,16 и 394,32 мкм по стороне, где модель продемонстрировала устойчивое поведение с метрикой F1-меры $0,8962 \pm 0,0508$, а в отдельных запусках – рекордное значение 0,9697. При этом наблюдаемое стандартное отклонение объясняется нестабильностью модели, а естественной вариабельностью медицинских данных, связанной с различиями в окраске, морфологии и стратегии разметки.

2. Полученные результаты открывают перспективы для использования данной технологии в системах компьютерной помощи диагностике в качестве средства для автоматического выделения подозрительных участков на полнослайдовых изображениях. Однако предложенный подход имеет ряд ограничений: зависимость от качества ручной разметки, недостаточная интерпретируемость решений, принимаемых моделью, и эмпирический выбор конфигурации входных масштабов. Одно из направлений дальнейшего исследования заключается во внедрении методов поиска оптимальных архитектур для оптимизации комбинации увеличений, в использовании обучаемых механизмов слияния признаков, а также в применении подходов к визуализации карт активаций для повышения интерпретируемости принимаемых решений.

3. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта «Наука М 2025» № Ф25М-001. Отдельная благодарность выражается М. В. Фридману за предоставленную разметку гистопатологических изображений, а также В. А. Ковалеву за ценные научные консультации.

Список литературы

1. Multi-Scale Feature Fusion Convolutional Neural Network for Indoor Small Target Detection / L. Huang [et al.] // Frontiers in Neurorobotics. 2022. Vol. 16. DOI: 10.3389/fnbot.2022.881021.
2. Liu Wenzhuo. Multi-Scale Unified Network for Image Classification / Liu Wenzhuo, Zhu Fei, Liu Cheng-Lin // arXiv preprint. 2024. Mode of access: <https://arxiv.org/abs/2405.12345>. Date of access: 09.10.2025.

3. Papillary Thyroid Carcinoma Semantic Segmentation Using Multi-Scale Adaptive Convolutional Network with Dual Decoders / T. Parasporins [et al.] // IEEE Access. 2025. Vol. 13. P. 17340–17353. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3532505.
4. Cell Detection in Pathology and Microscopy Images with Multi-Scale Fully Convolutional Neural Networks / X. Pan [et al.] // World Wide Web. 2018. Vol. 21. P. 1721–1743. DOI: 10.1007/s11280-017-0520-7.
5. Методика формирования базы гистопатологических изображений папиллярного рака щитовидной железы для глубокого обучения / М. В. Фридман [и др.] // Информатика. 2023. Т. 20, №. 2. С. 28–38. DOI: 10.37661/1816-0301-2023-20-2-28-38.
6. Attention Is All You Need / A. Vaswani [et al.] // arXiv preprint. 2017. Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1706.03762>. Date of access: 09.10.2025.
7. Tan, M. EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks / M. Tan, Q. V. Le // Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning (ICML 2019), Long Beach, California, USA, 9–15 June 2019. Long Beach, 2019. P. 6105–6114.
8. Multi_input_network-Histologia [Electronic Resource] // GitHub. Mode of access: https://github.com/Ruiu4317/Multi_input_network-Histologia. Date of access: 14.10.2025.

Поступила 14.10.2025

Принята в печать 27.11.2025

References

1. Huang L., Zhang Y., Yang X., Wang Z., Li H. (2022) Multi-Scale Feature Fusion Convolutional Neural Network for Indoor Small Target Detection. *Frontiers in Neurorobotics*. 16. DOI: 10.3389/fnbot.2022.881021.
2. Liu Wenzhuo, Zhu Fei, Liu Cheng-Lin (2024) Multi-Scale Unified Network for Image Classification. *arXiv preprint*. Available: <https://arxiv.org/abs/2405.12345> (Accessed 9 October 2025).
3. Parasporins T., Payatsuporn P., Jitaree A., Boonkong C. (2025) Papillary Thyroid Carcinoma Semantic Segmentation Using Multi-Scale Adaptive Convolutional Network with Dual Decoders. *IEEE Access*. 13, 17340–17353. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3532505.
4. Pan X., Yang D., Li L., Xie W., Yang H., Chen S. (2018) Cell Detection in Pathology and Microscopy Images with Multi-Scale Fully Convolutional Neural Networks. *World Wide Web*. 21, 1721–1743. DOI: 10.1007/s11280-017-0520-7.
5. Fridman M. V., Kosareva A. A., Snejhko E. V., Kamlach P. V., Kovalev V. A. (2023) Papillary Thyroid Carcinoma Whole-Slide Images as a Basis for Deep Learning. *Informatics*. 20 (2), 28–38. DOI: 10.37661/1816-0301-2023-20-2-28-38 (in Russian).
6. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., et al. (2017) Attention Is All You Need. *arXiv preprint*. Available: <https://arxiv.org/abs/1706.03762> (Accessed 9 October 2025).
7. Tan M., Le Q. V. (2019) EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks. *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning (ICML 2019), Long Beach, California, USA, 9–15 June*. Long Beach. 6105–6114.
8. Multi_input_network-Histologia. *GitHub*. Available: https://github.com/Ruiu4317/Multi_input_network-Histologia (Accessed 14 October 2025).

Received: 14 October 2025

Accepted: 27 November 2025

Сведения об авторе

Косарева А. А., ассист. каф. электронной техники и технологии, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; мл. науч. сотр. Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларусь

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-60
E-mail: kosareva@bsuir.by
Косарева Александра Андреевна

Information about the author

Kosareva A. A., Assistant at the Electronic Engineering and Technology Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; Junior Researcher at the The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-60
E-mail: kosareva@bsuir.by
Kosareva Aleksandra Andreevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-110-118>

Авторское мнение

УДК 342.8:004(476)

ПЕРСПЕКТИВЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

С. А. ШМАРЛОВСКИЙ

Аппарат Центральной избирательной комиссии Республики Беларусь

Аннотация. Анализ применяемых цифровых инструментов в избирательном процессе ряда стран показал, что цифровая трансформация избирательных отношений представляет собой объективное направление развития в современном мире. В статье рассмотрена необходимость создания концептуальной основы для цифровизации избирательного процесса в Беларуси, что будет способствовать повышению уровня доступности выборов для всех категорий граждан и эффективному распределению ресурсов.

Ключевые слова: цифровизация избирательного процесса, распределение ресурсов, искусственный интеллект.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Шмарловский, С. А. Перспективы цифровизации избирательного процесса в Республике Беларусь / С. А. Шмарловский // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 110–118. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-110-118>.

PROSPECTS FOR DIGITALIZATION OF THE ELECTORAL PROCESS IN THE REPUBLIC OF BELARUS

SIARHEI A. SHMARLOUSKI

Office of the Central Election Commission of the Republic of Belarus

Abstract. An analysis of digital tools used in the electoral process in several countries has shown that the digital transformation of electoral relations is an objective development direction in the modern world. This article examines the need to create a conceptual framework for the digitalization of the electoral process in Belarus, which will contribute to increased accessibility of elections for all categories of citizens and the efficient allocation of resources.

Keywords: digitalization of the electoral process, resource allocation, artificial intelligence.

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

For quoting. Shmarlouski S. A. (2025) Prospects for Digitalization of the Electoral Process in the Republic of Belarus. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 110–118. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-110-118> (in Russian).

Введение

В современном мире, где информация распространяется со «скоростью света», а технологии проникают во все сферы жизни, избирательный процесс не остается в стороне. Уровень цифровизации напрямую влияет на эффективность информационных кампаний и служит своеобразным индикатором общего уровня цифрового развития государства.

В Республике Беларусь создана эффективная инфраструктура электронного правительства, организовано взаимодействие субъектов с 70 информационными ресурсами. В рейтинге ООН Беларусь вошла в группу стран с высоким уровнем развития электронного правительства, заняв 77-е место среди 193 государств [1, с. 172]. В стране развивается информационно-коммуникационная инфраструктура, достигнут целевой показатель по охвату населения услугами сотовой электросвязи по технологии LTE (4G) 99 %, по сравнению с 89,5 % в 2020-м, что позволяет достичь количества абонентов мобильной связи более 100 % [2].

Вместе с тем необходимо констатировать, что уровень цифровизации избирательного процесса в республике остается низким. Под цифровизацией избирательного процесса понимается внедрение и использование цифровых технологий на всех этапах: от регистрации избирателей и предоставления информации о кандидатах до голосования и подсчета голосов. Белорусское законодательство предусматривает использование ресурсов государственной информационной системы «Регистр населения» при формировании списков избирателей, что регламентировано положениями части второй статьи 19 Избирательного кодекса Республики Беларусь [3, с. 16, 17].

Центральной избирательной комиссией Республики Беларусь (далее – ЦИК) используется сервис по поиску участка для голосования. Здания и сооружения, где размещаются участки для голосования, оснащены системами видеонаблюдения. Избиратели информируются посредством интернет-сайта ЦИК (www.rec.gov.by), мессенджеров и соцсетей, а также информационных ресурсов исполнкомов и местных администраций, в структуре которых создается раздел «Выборы».

К основным рискам и угрозам цифровизации избирательного процесса можно отнести внешнее воздействие в виде кибератак и хакерских вмешательств. Несмотря на растущее внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) в системы автоматизации выборов, данная сфера остается недостаточно проработанной. Необходима разработка нормативных правовых актов и стандартов, системы мониторинга негативных последствий использования ИИ в этой сфере.

Современные информационные технологии достигли такого уровня, что по заданным человеком критериям автоматические системы способны генерировать и размещать в сети не только текст, но и аудиовизуальные материалы, не отличимые от реальных. При этом скорость такого распространения делает невозможным борьбу с фейками традиционными средствами. Неслучайно Президент Республики Беларусь А. Г. Лукашенко неоднократно высказывал обеспокоенность по поводу перспектив неконтролируемого использования возможностей ИИ. В числе острых вопросов – информационная безопасность и киберугрозы. «С одной стороны, современные технологии создают тысячи новых возможностей и перспектив. С другой – они порождают множество рисков и угроз – фейки, дезинформацию, атаки на критическую инфраструктуру», – отмечал Глава государства [4].

Анализ применяемых цифровых инструментов

Мировые державы синхронно пересмотрели стратегии развития искусственного интеллекта. Россия, Китай, США и Европа сходятся во мнении, что ИИ в ближайшем будущем станет базовой технологией, определяющей положение государства на мировой арене. Поэтому промедление в этой гонке недопустимо как в целом, так и в избирательной сфере в частности. В этой связи изучение ИИ и внедрение информационных технологий в контексте обеспечения избирательного суверенитета видится актуальной задачей, в том числе для организаторов выборов.

Рост и усложнение методов киберугроз требуют опережающего и комплексного реагирования. В Беларуси принят ряд системных мер, и борьба с киберугрозами ведется на нескольких уровнях. Так, на государственном уровне, согласно Указу Президента Республики Беларусь от 14.02.2023 № 40 «О кибербезопасности», реализуется комплексный многоуровневый механизм противодействия кибератакам на государственные органы и организации, критическую информационную инфраструктуру [5]. Создан Национальный центр обеспечения кибербезопасности и реагирования на киберинциденты, налажено международное сотрудничество в этой сфере.

Созданы необходимые правовые условия для защиты персональных данных и безопасности личности и общества при их использовании. Закон Республики Беларусь от 7 мая 2021 г. № 99-З «О защите персональных данных» устанавливает границы, определяющие, какую информацию о человеке можно собирать и распространять [6]. В этой связи избирательным законодательством запрещено публиковать персональные данные людей, входящих в состав избирательных комиссий (около 70 тыс. чел. входит в их состав).

Анализ применяемых цифровых инструментов в избирательном процессе ряда стран показал, что цифровая трансформация избирательных отношений представляет собой объективное направление развития в современном мире. Внедрение информационных технологий строится на концептуальной основе и обладает необходимым регулированием [7, 8].

Разработка концептуальной основы для цифровизации избирательного процесса в Беларуси обусловлена необходимостью повышения уровня доступности выборов для всех категорий граждан, возможностью облегчить работу членов избирательных комиссий, а также эффективного распределения ресурсов. Так, отсутствие единой системы учета избирателей приводит к значительным временными задержкам в актуализации данных (сведения об изменении места жительства, факте смерти и др.). Это, в свою очередь, отражается на качестве списков избирателей, провоцируя острые ситуации на участках для голосования, а иногда и вызывая недоверие граждан к избирательной системе в целом. За исключением личного обращения в участковую комиссию у избирателя отсутствует возможность проверки корректности внесения данных о нем в список избирателей.

В случае проживания не по месту регистрации избиратель должен лично прийти на участок для голосования и подать заявку на включение его в список на выбранном участке, что приводит к потерям времени как избирателя, так и членов участковой комиссии при проверке факта голосования данного избирателя на участке по месту основной регистрации. Дополнительно следует отметить, что отсутствие актуальной информации о количестве и территориальном распределении избирателей в межвыборный период может приводить к значительным отклонениям от средних значений численности избирателей при образовании округов, а в отдельных случаях – к образованию участков с превышением предельно допустимых показателей.

Сбор электоральной статистики осуществляется в соответствии с утвержденными формами и имеет строго иерархическую структуру. Информация агрегируется снизу вверх: от нижестоящих избирательных комиссий к областным и Минской городской, и только затем поступает в ЦИК. На всех уровнях для передачи данных используются традиционные каналы связи (телефон, факс, электронная почта), а их консолидация производится вручную или в программе MS Excel. Хотя этот подход и является единственным возможным при отсутствии единой информационной системы, он не отвечает современным стандартам эффективности. Его ключевые недостатки включают:

- значительные временные затраты на сбор и обобщение данных;
- необходимость заблаговременного согласования и утверждения форматов электоральных сведений для подготовки сводных таблиц на промежуточных уровнях;
- высокий риск задержек в обработке данных по всей стране из-за возможных сбоев связи в отдельных регионах.

При этом электоральная статистика не содержит сводных данных о результатах голосования по каждому избирательному участку в стране. Также нет информации о гендерном и возрастном распределении избирателей, принявших участие в голосовании.

Системное использование информационно-коммуникационных технологий на выборах в нашей стране тоже потребует регламентации правовых, технологических и финансовых обязательств участников таких отношений, выработки соответствующего понятийного аппарата. Изучение научной литературы и зарубежного опыта цифровизации избирательного процесса позволяет выделить основные принципы построения концепции и ее ключевые элементы [7–9].

Среди основных принципов построения концепции цифровизации избирательного процесса можно выделить следующие.

Принцип прозрачности и открытости. Все программное обеспечение, используемое в избирательном процессе, должно быть отечественного производства и доступно для независимого аудита. Открытый исходный код позволяет экспертам и общественности убедиться в отсутствии

скрытых уязвимостей и манипуляций. Это укрепляет доверие к системе, демонстрируя ее честность и неподкупность.

Результаты голосования, статистика явки, информация о кандидатах и партиях должны быть доступны для общественного анализа. При этом необходимо строго соблюдать конфиденциальность персональных данных избирателей, используя анонимизацию и агрегацию информации. Предоставление возможности онлайн-наблюдения за процессом голосования и подсчета голосов, в том числе через видеопотоки с избирательных участков, значительно повышает прозрачность и снижает риск нарушений.

Принцип доступности и инклюзивности. Предоставление избирателям различных способов голосования – от традиционного на избирательных участках до дистанционного электронного голосования и голосования на дому – обеспечивает максимальную доступность для всех категорий граждан, включая людей с ограниченными возможностями, проживающих в отдаленных районах или находящихся за рубежом.

Создание удобных и доступных онлайн-платформ для предоставления информации о выборах, кандидатах, избирательных участках, правилах голосования. Эти платформы должны быть адаптированы для различных устройств и пользователей, включая людей с нарушениями зрения или слуха. Цифровизация должна упрощать процесс регистрации избирателей, получения информации и самого голосования, делая его интуитивно понятным и доступным для широкой аудитории, независимо от уровня ее цифровой грамотности.

Принцип безопасности и защиты данных. Внедрение передовых криптографических методов шифрования, аутентификации и авторизации для защиты персональных данных избирателей и результатов голосования от несанкционированного доступа, изменения или удаления. Разработка и постоянное совершенствование систем защиты от DDoS-атак, взломов и других видов киберугроз, которые могут поставить под угрозу целостность избирательного процесса.

Использование надежных методов идентификации избирателей, таких как биометрия или двухфакторная аутентификация, для предотвращения двойного голосования и обеспечения того, что голосуют только зарегистрированные граждане. Регулярное проведение независимых аудитов безопасности и тестирования на проникновение для выявления и устранения потенциальных уязвимостей.

Принцип надежности и отказоустойчивости. Создание надежных систем резервного копирования данных и планов аварийного восстановления для обеспечения непрерывности избирательного процесса в случае сбоев или чрезвычайных ситуаций. Цифровые системы должны быть спроектированы с учетом возможности масштабирования для обработки большого количества запросов и данных, особенно в периоды пиковой нагрузки во время выборов. Тестирование оборудования и его поддержание в работоспособном состоянии, модернизация в соответствии с современными требованиями.

Ключевыми элементами концептуальных подходов к цифровизации избирательного процесса являются:

– правовое обеспечение: цифровизация избирательного процесса требует четкой законодательной поддержки. Необходимо разработать и внедрить нормативные акты, регулирующие использование цифровых технологий и электронных систем голосования, защиту персональных данных избирателей, а также меры по обеспечению безопасности и прозрачности выборов. Законодательство должно предусматривать ответственность за нарушения и механизмы контроля;

– технологическая инфраструктура: создание надежной и масштабируемой технологической платформы – основа цифровизации. Важно обеспечить высокую степень защиты данных, устойчивость к кибератакам и возможность интеграции с существующими системами. Использование блокчейн-технологий, биометрической идентификации и ИИ может значительно повысить уровень доверия к электронным выборам;

– обеспечение безопасности и конфиденциальности: безопасность избирательного процесса – ключевой аспект цифровизации. Необходимо внедрять многоуровневые системы защиты, включая шифрование данных, аутентификацию пользователей и мониторинг подозрительной активности. Конфиденциальность голосования должна быть гарантирована на всех этапах, чтобы исключить возможность манипуляций и утечки информации;

– образовательные и информационные кампании: для успешного внедрения цифровых технологий важно обеспечить информированность и подготовку избирателей, членов избирательных комиссий и других участников процесса. Образовательные программы и правовое просвещение помогут повысить цифровую грамотность, снизить уровень недоверия и сопротивления изменениям, а также обеспечить корректное использование новых инструментов;

– инклюзивность и доступность: цифровизация должна учитывать потребности всех категорий избирателей, включая людей с ограниченными возможностями, пожилых граждан и жителей отдаленных регионов. Разработка удобных интерфейсов, обеспечение альтернативных способов голосования и поддержка различных устройств помогут сделать процесс доступным и удобным для всех участников выборов.

Учитывая современные реалии в области цифровых технологий и ИИ, использование их в избирательном процессе, ЦИК своим постановлением от 01.03.2023 № 2 «О создании межведомственной рабочей группы по автоматизации избирательного процесса» инициировала разработку концепции цифровизации избирательного процесса. С этой целью была создана межведомственная рабочая группа, которая изучила возможности разработки и внедрения программных и программно-аппаратных решений для автоматизации избирательного процесса в Беларусь, в том числе с учетом опыта России. Так, в России существует интегрированное решение ГАС «Выборы», что служит примером масштабной автоматизации [10]. Беларусь находится в стадии активной разработки системной автоматизации, нацеленной на стандартизацию и повышение информативности процессов: создан проект общей концепции Государственная автоматизированная информационная система «Выборы» (ГАИС «Выборы»). Цель разработки ГАИС «Выборы» – комплексная автоматизация избирательного процесса на всех его стадиях при условии эффективности информационно-коммуникационных решений и безопасности их использования. Для достижения цели сформулированы основные задачи:

- модульное построение программно-аппаратного комплекса с возможностью поэтапного ввода в эксплуатацию;
- взаимодействие с внешними информационными системами;
- создание эффективной комплексной системы информационной безопасности;
- разработка средств обучения работы с системой.

ГАИС «Выборы» включает разработку следующих модулей.

«Регистр избирателей». Должен содержать базу данных избирателей и механизмы составления выборок из этой базы по заданным критериям. Информация о гражданах, обладающих избирательным правом, с определенной периодичностью и в определенном формате должна выгружаться из ГИС «Регистр населения» специалистами Департамента по гражданству и миграции Министерства внутренних дел и загружаться в регистр избирателей. Данный модуль целесообразно разместить на серверах Национального центра электронных услуг и возложить функции его администрирования, в том числе контроль доступа со стороны модулей ГАИС «Выборы» и иных государственных ресурсов, на специалистов центра.

«Избирательные комиссии и участки для голосования». Представляет собой непосредственно базу данных, а также набор сервисов, работающих с этой базой, которая содержит сведения об образованных территориальных, окружных и участковых избирательных комиссиях, включая адреса, контактную информацию, составы комиссий, а также сведения о наполнении участков. Адресная база данных формируется на основе данных регистра избирателей. Таким образом, на участки разбивается весь жилой фонд Республики Беларусь, что минимизирует ошибки при формировании участков. Посредством этой подсистемы в автоматическом режиме готовятся проекты решений исполнкомов и местных администраций об образовании участков для голосования, а также база данных для сервиса, позволяющего избирателю с помощью мобильного устройства или персонального компьютера найти свой участок и проверить себя в списке избирателей. В перспективе с помощью сервиса возможно автоматическое деление территории страны на округа и участки исходя из актуальной численности избирателей.

«Кабинет избирателя». Модуль целесообразно интегрировать в Единый портал электронных услуг. Тем самым по единой авторизации на данном портале избиратель сможет получить информацию о своем участке для голосования, проверить себя в списке избирателей, получить иную

информацию об избирательной кампании и избирательном законодательстве. В случае технической возможности и достаточных правовых оснований посредством данного сервиса избиратель сможет выбрать участок для голосования, оставить заявку на голосование по месту жительства, поставить подпись в поддержку выдвижения кандидата, а также проголосовать.

«Кабинет участника избирательной кампании». Размещается в рамках Единого портала электронных услуг и становится доступным после авторизации лицам, зарегистрированным в качестве выдвигаемого лица, кандидата, его финансового представителя, доверенного лица, и имеет соответствующий функционал. Сервис включает в себя подсистему контроля за поступлением и расходованием средств избирательных фондов, а также механизмы представления агитационной продукции и информации о планируемых агитационных мероприятиях избирательным комиссиям. Средствами данного модуля в избирательные органы направляются финансовые отчеты, фотографии и биографические данные лиц после их регистрации в качестве кандидатов, документы для регистрации доверенных лиц и финансовых представителей. В кабинете участника избирательной кампании размещаются объявления, разъяснения избирательного законодательства и другая информация, которую избирательным комиссиям следует довести до участников выборов, в том числе персонально.

«Финансирование». Подсистема отвечает за аккумулирование и анализ финансовой информации, получаемой из банковских учреждений, избирательных комиссий всех уровней, а также от участников избирательной кампании. Во взаимодействии с модулем «Кабинет участника избирательной кампании» реализуется механизм контроля поступления и расходования средств избирательных фондов.

«Дистанционное электронное голосование». Работает в связке с «Кабинетом избирателя» и предназначен для организации голосования отдельных категорий граждан посредством личных технических средств избирателей (мобильный телефон, планшет, компьютер и т. п.). Функциями модуля являются анонимизирование голоса избирателя, а также передача сведений о ходе и результатах дистанционного электронного голосования в соответствующие избирательные комиссии.

«Автоматизированное рабочее место «Организатор выборов». Предназначен для автоматизации рабочих процессов избирательной комиссии любого уровня, а также предоставления отдельного функционала сотрудникам исполнкомов и местных администраций, в том числе для ведения персональных списков членов избирательных комиссий, кандидатов и других лиц, участвующих в избирательной кампании, электронного учета и анализа подписных листов, получения и редактирования списков избирателей, внесения, передачи и обобщения избирательной статистики, электронного ведения рабочих журналов, составления протоколов. Необходимо предусмотреть встроенный мессенджер с возможностью передачи файлов и проведения видеоконференций, что будет востребовано при взаимодействии комиссий, а также при проведении тренингов и организации совещаний между избирательными комиссиями различного уровня. Посредством данного модуля в перспективе избирательные комиссии, регистрирующие кандидатов, должны иметь возможность создания макетов избирательных бюллетеней, которые в последующем будут использоваться как для печати бюллетеней, так и для распознавания их сканов при автоматическом подсчете голосов.

Для участковой комиссии подсистема должна иметь функцию автоматической проверки факта голосования избирателя на другом участке при регистрации избирателя в электронном списке избирателей с возможностью печати бюллетеня, содержащего информацию (возможно, в виде QR-кода) об участке для голосования, избирательном округе, дате голосования (либо признак досрочное/в основной день). Это позволит упразднить требование о наличии подписей не менее двух членов комиссии на оборотной стороне бюллетеня.

«Автоматизированное рабочее место «Подсчет голосов». Предполагает использование высокоскоростного документного сканера, принтера, компьютера и специализированного программного обеспечения, одна часть которого отвечает за распознавание сканов бюллетеней, а вторая осуществляет сведение результатов и передачу их на сервер для обобщения и подготовки итоговых протоколов. Помимо этого, модуль должен иметь возможность хранения сканов бюллетеней для последующего анализа при возникновении спорных ситуаций, а также инстру-

менты передачи сканов для всеобщего обозрения (если такое решение будет принято) в удобном и емком формате.

«Обучение работе с системой». Представляет собой обучающий комплекс. В зависимости от роли обучаемого и, соответственно, предоставляемого ему доступа к различным компонентам системы данный модуль генерирует интерактивный обучающий курс и предложит механизм проверки полученных знаний. Для функционирования ГАИС «Выборы», помимо разработки уникального программного обеспечения, необходимо обеспечить наличие в каждой избирательной комиссии компьютера и принтера, а в случае перехода к сканированию бюллетеней – также документного сканера и программы для распознавания текста. Общее количество оборудования должно предусматриваться с учетом необходимого резерва на случай технических неисправностей. Технические требования для работы ГАИС «Выборы» к персональным компьютерам и принтерам должны позволять использовать имеющуюся техническую базу учреждений, на базе которых работают избирательные комиссии (учреждения образования и здравоохранения, общежития, воинские части и иные организации).

Для устойчивого функционирования ГАИС «Выборы» требуется обеспечивать надежное функционирование Единого портала электронных услуг, серверов, линий связи. Следует отметить, что концепция достаточно полно отражает взаимодействие основных объектов и субъектов избирательного процесса, этапы планирования и организации избирательной кампании, использование современных подходов к идентификации субъектов и комплексному обеспечению информационной безопасности.

Для комплексного решения задач, связанных с организацией избирательных процессов на современном уровне в соответствии с положениями Директивы Президента Республики Беларусь от 27 декабря 2006 г. № 2 «О демократизации государственного аппарата и повышении качества обеспечения жизнедеятельности населения» (в ред. Указа Президента Республики Беларусь от 13.06.2023 № 172), Указа Президента Республики Беларусь от 29.07.2021 № 292 «Об утверждении Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы», постановления Совета Министров Республики Беларусь от 02.02.2021 № 66 (ред. от 08.02.2023) «О Государственной программе «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы» видится целесообразным внедрение соответствующей ГАИС «Выборы», которая будет предусматривать комплексную автоматизацию избирательного процесса на всех его стадиях при условии, с одной стороны, эффективности информационно-коммуникационных решений, а с другой – безопасности их использования.

Реализация общей концепции ГАИС «Выборы» предполагает ряд мероприятий по ее внедрению:

- обсуждение проекта с государственными органами, организаторами выборов, обобщение предложений и корректировка документа;
- проведение экспертизы;
- утверждение общей концепции (для этих целей необходимо издание соответствующего Указа Президента Республики Беларусь);
- разработка под каждый модуль технического задания с определением ответственных исполнителей и источников финансирования;
- апробация работы каждого модуля и его поэтапное внедрение в избирательный процесс;
- для правового регулирования эксплуатации ГАИС «Выборы» потребуется принятие соответствующего закона, а также корректировка Избирательного кодекса Республики Беларусь и иных нормативных правовых актов;
- с учетом расширения видов деятельности, связанной с цифровизацией избирательного процесса, необходимо разработать и внедрить актуальную модель управления избирательным процессом.

Заключение

1. На основании проведенного анализа организационных механизмов и технологических инструментов подготовки и проведения избирательных кампаний выявлены как общие тенденции управления избирательным процессом, так и современные системы его автоматизации и особен-

ности внедрения информационных технологий в организацию выборов, что нашло отражение в концепции цифровизации избирательного процесса в Республике Беларусь.

2. Цифровизация избирательного процесса должна соответствовать всем требованиям безопасности, ее основные модули должны работать на программном продукте отечественного производства и не зависеть от внешних факторов (санкции, кибератаки и пр.). При этом ее внедрение не должно идти вразрез с основными принципами проведения выборов (всеобщего, свободного, равного и тайного голосования).

Список литературы

1. Исследование ООН: электронное правительство 2024. Ускорение цифровой трансформации для устойчивого развития [Электронный ресурс] // United Nations. Департамент по экономическим и социальным вопросам. Нью-Йорк: ООН, 2024. Режим доступа: <https://desapublications.un.org/sites/default/files/publications/2025-01/E-Government%20Survey%202024%20RUS-compressed.pdf>. Дата доступа: 09.12.2025.
2. Проект программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2026–2030 годы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://president.gov.by/ru/events/sovesanie-o-dorobotke-programmy-social-no-ekonomiceskogo-razvitiya-belorussi-na-2026-2030-gody>. Дата доступа: 10.11.2025.
3. Избирательный кодекс Республики Беларусь: с изменениями, вступившими в силу 4 марта 2023 г. Минск: Нац. центр правов. инфор. Респ. Беларусь, 2023.
4. Саммит Организации Договора о коллективной безопасности [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал Президента Республики Беларусь. Режим доступа: <https://president.gov.by/ru/events/sammit-organizacii-dogovora-o-kollektivnoj-bezopasnosti>. Дата доступа: 09.12.2025.
5. О кибербезопасности: Указ Президента Республики Беларусь от 14.02.2023 № 40 [Электронный ресурс] // Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32300040>. Дата доступа: 09.12.2025.
6. О защите персональных данных: Закон Республики Беларусь от 07.05.2021 № 99-З [Электронный ресурс] // Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь. Режим доступа: pravo.by. Дата доступа: 09.12.2025.
7. Цифровизация и выборы. СПб.: Секретариат Совета МПА СНГ, 2021.
8. Ткаченко, С. Л. Наблюдение за дистанционным электронным голосованием в государствах-участниках МПА СНГ / С. Л. Ткаченко, Р. А. Амбуццев. СПб.: Секретариат Совета МПА СНГ, 2024.
9. Соодонбеков, А. А. Электронное голосование как способ противодействия нарушениям в современном избирательном процессе (на примере Кыргызской Республики) / А. А. Соодонбеков // Правопорядок: история, теория, практика. 2024. № 1. С. 182–187.
10. Шапошников, А. В. Российский опыт использования цифровых технологий в избирательном процессе / А. В. Шапошников // Журнал Белорусского государственного университета. Право. 2024. № 1. С. 39–45. <https://journals.bsu.by/index.php/law/article/view/6088>.

Поступила 18.11.2025

Принята в печать 11.12.2025

References

1. UN Study: E-Government 2024. Accelerating the Digital Transformation for Sustainable Development. *Department of Economic and Social Affairs*. New York, United Nations UN. Available: <https://desapublications.un.org/sites/default/files/publications/2025-01/E-Government%20Survey%202024%20RUS-compressed.pdf> (Accessed 9 December 2025) (in Russian).
2. *Draft Program for the Socio-Economic Development of the Republic of Belarus for 2026–2030*. Available: <https://president.gov.by/ru/events/sovesanie-o-dorobotke-programmy-social-no-ekonomiceskogo-razvitiya-belorussi-na-2026-2030-gody> (Accessed 9 Noveber 2025) (in Russian).
3. *Electoral Code of the Republic of Belarus: with Amendments that Entered into Force on March 4, 2023*. Minsk, National Center for Legal Information of the Republic of Belarus (in Russian).
4. *Summit of the Collective Security Treaty Organization. Official Internet Portal of the President of the Republic of Belarus*. Available: <https://president.gov.by/ru/events/sammit-organizacii-dogovora-o-kollektivnoj-bezopasnosti> (Accessed 9 December 2025) (in Russian).
5. On Cybersecurity: Decree of the President of the Republic of Belarus Dated February 14, 2023 No 40. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32300040> (Accessed 9 December 2025) (in Russian).
6. On the Protection of Personal Data: Law of the Republic of Belarus Dated 07.05.2021 No 99-Z. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available: pravo.by (Accessed 9 December 2025) (in Russian).

7. *Digitalization and Elections*. St. Petersburg: Secretariat of the Council of the CIS Interparliamentary Assembly, 2021 (in Russian).
8. Tkachenko S. L., Amburtsev R. A. (2024) *Observation of Remote Electronic Voting in the Member States of the Interparliamentary Assembly CIS*. St. Petersburg: Secretariat of the Council of the CIS Interparliamentary Assembly, 2021 (in Russian).
9. Soodonbekov A. A. (2024) Electronic Voting as a Way to Combat Violations in the Modern Electoral Process (Using The Example of the Kyrgyz Republic). *Law and Order: History, Theory, Practice*. (1), 182–187 (in Russian).
10. Shaposhnikov A. V. (2024) Russian Experience in Using of Digital Technologies in the Electoral Process. *Journal of the Belarusian State University. Law*. (1), 39–45 (in Russian).

Received: 18 November 2025

Accepted: 11 December 2025

Сведения об авторе

Шмарловский С. А., нач. отдела организационной, финансовой работы и международного сотрудничества, аппарат Центральной избирательной комиссии Республики Беларусь

Адрес для корреспонденции

220010, Республика Беларусь,
Минск, ул. Советская, 11
Аппарат Центральной избирательной комиссии
Республики Беларусь
Тел.: +375 17 327-19-15
E-mail: serge-shmarlovski@yandex.ru
Шмарловский Сергей Александрович

Information about the author

Shmarlouski S. A., Head of the Department of Organizational, Financial Work and International Cooperation, Office of the Central Election Commission of the Republic of Belarus

Address for correspondence

220010, Republic of Belarus,
Minsk, Sovetskaya St., 11
Office of the Central Election Commission
of the Republic of Belarus
Tel.: +375 17 327-19-15
E-mail: serge-shmarlovski@yandex.ru
Shmarlouski Siarhei Aleksandrovich

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ РАЗДЕЛА «СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ»

В помощь авторам при формировании литературных источников в разделе «Список литературы» предлагаем несколько примеров их оформления согласно Приложению 2 к Инструкции по оформлению диссертации, автореферата и публикаций по теме диссертации (ВАК) (тире, указанные в таблице Приложения 2 для оформления источников, не ставим). Полный шаблон для оформления статей можно найти по ссылке: <https://doklady.bsuir.by/jour/about/submissions#authorGuidelines>.

1. Теория кодирования / Т. Касами [и др.]; пер. с япон. А. В. Кузнецова. М.: Мир, 2006.
2. Галкин, Я. Д. Улучшенная модель двухзатворного JFET для аналоговых интегральных микросхем / Я. Д. Галкин, О. В. Дворников, В. А. Чеховский // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 3. С. 20–25. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-20-25>.
3. Hacker, P. S. Range Distance Requirement for Measuring Low and Ultralow Sidelobe Antenna Patterns / P. S. Hacker, H. E. Schrank // IEEE Trans. Antennas and Propagation Magazine. 1982. Vol. AP-30, No 5. P. 956–966.
4. Авиационные правила организации и проведения летной проверки средств радиолокации, средств связи и радиотехнического обеспечения полетов государственной авиации Республики Беларусь: пост. Мин-ва обороны Респ. Беларусь от 14.04.2017 № 7.
5. Respiration Rate and Volume Measurements Using Wearable Strain Sensors / M. Chu [et al.] // npj. Digital Medicine. 2019. No 2. <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0083-3>.
6. Устройство для измерения активной и емкостной составляющих импеданса биологических тканей: пат. 2196504 Рос. Федерации, МПК A 61 B 5/053 / А. В. Ефремов, Р. Р. Ибрагимов, Р. А. Манвелиадзе, В. Т. Леонтьев, К. Г. Булатецкий, Г. Г. Колонда, Е. В. Тарасов, Р. Ш. Ибрагимов; Новосиб. гос. мед. акад., № 2000117324/14. Заявл. 28.06.2000. Опубл. 20.01.2003.
7. Программная модель системы для анализа импедансометрических характеристик биологических жидкостей / К. Е. Мешкова [и др.] // Медэлектроника–2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. ст. XIII Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 8–9 декабря 2022 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2022. С. 93–97.
8. Измеритель иммитанса E7-20 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mnipi.ru/products.php?group=6&device=0>. Дата доступа: 07.05.2023.

При оформлении раздела **REFERENCES** в цитируемой публикации следует указывать ВСЕХ авторов (если их более 6-ти, то после 6-го ставить et al. – см. пример под цифрами 5, 6).

1. Kasami T., Tokura N., Iwadari E., Inagaki Ya. (2006) *Coding Theory*. Transl. from Japan by A.V. Kuznetsov. Moscow, Mir Publ. (in Russian).
2. Galkin Y. D., Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A. (2022) Double Gate JFET Improved Model for Analog Integrated Circuits. *Doklady BGUIR*. 20 (3), 20–25. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-20-25> (in Russian).
3. Hacker P. S., Schrank H. E. (1982) Range Distance Requirement for Measuring Low and Ultralow Sidelobe Antenna Patterns. *IEEE Trans. Antennas and Propagation Magazine*. AP-30 (5), 956–966.
4. Equipment and Radio Technical Support for State Aviation Flights of the Republic of Belarus. *Resolution of the Ministry of Defense of the Republic of Belarus*, Apr. 14 2017, No 7 (in Russian).
5. Chu M., Nguyen T., Pandey V., Zhou Y., Hoang N. Pham, Bar-Yoseph R., et al. (2019) Respiration Rate and Volume Measurements Using Wearable Strain Sensors. *npj Digital Medicine*. (2). <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0083-3>.
6. Efremov A. V., Ibragimov R. R., Manveliadze R. A., Leontiev V. T., Bulatetsky K. G., Kolonda G. G., et al. (2003) Device for Measuring the Active and Capacitive Components of the Impedance of Biological Tissues. *Patent 2196504 Ros. Federation, IPC A 61 B 5/053. Novosibirsk State Medical Academy, No 2000117324/14. Stated 28.06.2000. Publ. 20.01.2003* (in Russian).
7. Meshkova K. E., Patseev S. V., Davydov M. V., Saveyko A. R., Pashkilevich V. V. (2022) A Software Model of a System for Analyzing the Impedance Characteristics of Biological Fluids. *Medelectronics–2022. Medical Electronics and New Medical Technologies, Collection of Scientific Articles of the XIII International Scientific and Technical Conference, Minsk, Dec. 8–9*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 93–97 (in Russian).
8. *Immittance Meter E7-20*. Available: <https://www.mnipi.ru/products.php?group=6&device=0> (Accessed 7 May 2023) (in Russian).

ДЛЯ ЗАМЕТОК