

---

---

# ДОКЛАДЫ БГУИР

---

---

**Выходит шесть раз в год**

Научный журнал издается с января 2003 года

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

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

## **Главный редактор**

**Вадим Анатольевич Богуш**

ректор Белорусского государственного университета  
информатики и радиоэлектроники

## **Редакционная коллегия**

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

## **Редакционный совет**

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

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### *ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА*

<b>Прокопьев С. Л., Гайдук П. И.</b> Чувствительность к метану нанокompозитных слоев SnO <sub>2</sub> (Ag) после импульсного лазерного облучения .....	5
<b>Ван Тунг Фам, Чубенко Е. Б., Борисенко В. Е.</b> Резисторная модель слоистых пленочных структур .....	14
<b>Муравьев В. В., Мищенко В. Н.</b> Влияние электрического поля на свойства гидрированного графена .....	21
<b>Кураев А. А., Матвеев В. В.</b> Дисперсия волн пространства-времени. Волновая и корпускулярная формы элементарной частицы .....	27
<b>Железняк В. К., Раханов К. Я., Адамовский Е. Р.</b> Оценка информационных показателей шума квантования аналого-цифрового преобразования речевого сигнала .....	32

<b>Ву Суан Чинь, Давыденко И. Н.</b> Корреляционные свойства шумовых сигналов на выходах приемных каналов с одиночным резонансным контуром.....	41
<b>Мордачев В. И.</b> Влияние неоднородности пространственного распределения периферийного радиооборудования сетей 4G/5G на уровень электромагнитного фона, создаваемого в зданиях ..	49
<b>Mukha V. S., Kako N. F.</b> Dual Stabilization of the Multidimensional Regression Object at the Given Level ( <b>Муха В. С., Како Н. Ф.</b> Дуальная стабилизация многомерного регрессионного объекта на заданном уровне).....	58
<b>Михнёнок Е. И., Хижняк А. В.</b> Аппаратно-программный комплекс для исследования совместного применения технических средств, построенных на различных физических принципах.....	68
<b>Tran Van Trieu, Stempitsky V. R., Lovshenko I. Yu., Korsak K. V., Dao Dinh Ha.</b> Design and Performance of Amorphous Silicon Based on Uncooled Bolometer-Type Infrared Focal Plane Arrays ( <b>Чан Ван Чиену, Стемпицкий В. Р., Ловшенко И. Ю., Корсак К. В., Дао Динь Ха.</b> Конструкция и характеристики неохлаждаемых болометрических инфракрасных решеток на основе аморфного кремния) .....	77
<b>Ярмолик В. Н., Петровская В. В., Иванюк А. А.</b> Свойства меры различия двоичных тестовых наборов управляемых вероятностных тестов.....	86
<b>Касумов В. А., Мамедов Дж. И.</b> Модель и метод определения оптимальной структуры системы обеспечения безопасности для критической информационной инфраструктуры .....	95
<b>Спринджук М. В., Берник В. И., Владыко А. С., Чжочжуан Лу, Титов Л. П.</b> Вычислительный анализ структурного состава геномов коронавирусов .....	104
<b>Vishniakou U. A., Shaya V. N.</b> Voice Detection Using Convolutional Neural Network ( <b>Вишняков В. А., Шайя В. Х.</b> Распознавание голоса с использованием свёрточной нейронной сети) .....	114

Все иллюстрации, выполненные в цвете, доступны для просмотра на сайте журнала.

Ответственный секретарь Т. В. Мироненко

Подписано в печать 06.04.2023. Формат бумаги 60×84%. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 14,18. Уч.-изд. л. 12,1. Тираж 85 экз. Заказ 58.

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 326, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-88-41. E-mail: doklady@bsuir.by; http://:doklady.bsuir.by

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

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

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2023

---

---

# DOKLADY BGUIR

---

---

**Published 6 times a year**

The journal is being published since January, 2003

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

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

**Chief Editor**

**Vadim Bogush**

Rector of the Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics

## CONTENTS

### *ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS*

<b>Prakopyeu S. L., Gaiduk P. I.</b> Methane Sensitivity of Pulsed Laser Treated SnO <sub>2</sub> (Ag) Nanocomposite Layers.....	5
<b>Van Tung Pham, Chubenko E. B., Borisenko V. E.</b> Resistor Model of Layered Film Structures...	14
<b>Muravyov V. V., Mishchenka V. N.</b> Influence of the Electric Field on the Properties of Hydrogenated Graphene.....	21
<b>Kurayev A. A., Matveyenka V. V.</b> Space-Time Dispersion of Waves. Wave and Corpuscular Forms of Elementary Particles.....	27
<b>Zheleznyak V. K., Rahanov K. Ja., Adamovskiy Y. R.</b> Evaluation of Information Indicators of Quantization Noise Generated by Speech Signal Analogue-Digital Conversion.....	32
<b>Vu Xuan Chinh, Davydzhenka I. N.</b> Correlation Properties of Noise Signals at the Outputs of Receiving Channels with a Single Resonant Circuit.....	41
<b>Mordachev V. I.</b> Influence of the Heterogeneity of Spatial Distribution of Peripheral Radio Equipment of 4G/5G Networks on the Level of Electromagnetic Background Created in Buildings.....	49
<b>Mukha V. S., Kako N. F.</b> Dual Stabilization of the Multidimensional Regression Object at the Given Level.....	58
<b>Mikhniionok E. I., Khizniak A. V.</b> Hardware and Software Complex for the Study of the Joint Use of Technical Means Based on Various Physical Principles.....	68

<b>Tran Van Trieu, Stempitsky V. R., Lovshenko I. Yu., Korsak K. V., Dao Dinh Ha.</b> Design and Performance of Amorphous Silicon Based on Uncooled Bolometer-Type Infrared Focal Plane Arrays.....	77
<b>Yarmolik V. N., Petrovskaya V. V., Ivaniuk A. A.</b> Dissimilarity Measure Properties of Binary Test Patterns of Controlled Random Tests.....	86
<b>Gasimov V. A., Mammadov J. I.</b> Model and Method for Determining the Optimal Structure of the Security System for Critical Information Infrastructure.....	95
<b>Sprindzuk M. V., Bernik V. I., Vladyko A. S., Zhuozhuang Lu, Titov L. P.</b> Computational Analysis of the Structural Composition of Coronavirus Genomes.....	104
<b>Vishniakou U. A., Shaya B. H.</b> Voice Detection Using Convolutional Neural Network .....	114

All illustrations made in color are available for viewing on the website.

Responsible Secretary T. Mironenko

---

Passed for printing 06.04.2023. Dimension of paper 60×84%. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times. Conventional printed sheet 14,18. An edition of 85 copies. Order list 58.

ADDRESS

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 6, P. Brovki St., Off. 326.  
Minsk, 220013, Republic of Belarus.  
Tel.: +375 17 293-88-41. E-mail: doklady@bsuir.by; http://:doklady.bsuir.by

---

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

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



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-5-13>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 539.24, 537.311, 544.032.65

## ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К МЕТАНУ НАНОКОМПОЗИТНЫХ СЛОЕВ $\text{SnO}_2(\text{Ag})$ ПОСЛЕ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

С. Л. ПРОКОПЬЕВ, П. И. ГАЙДУК

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

*Поступила в редакцию 11.10.2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Исследованы газочувствительные свойства слоев  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$ , полученных последовательным магнетронным распылением мишени  $\text{Sn} + \text{Ag}$ , окислением слоев  $\text{Sn}_{0,65}\text{Ag}_{0,35}$  при температуре  $650^\circ\text{C}$  в течение 30 мин и модифицированных импульсами лазерного излучения с плотностью энергии  $W = 1,5\text{--}3,2$  Дж/см<sup>2</sup>. Методами просвечивающей электронной микроскопии и просвечивающей электронной дифракции установлено, что слои  $\text{Sn}_{0,65}\text{Ag}_{0,35}$  и  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  являются нанокompозитными со средним размером зерен 100–150 нм. В зависимости от режимов их получения слои содержат зерна с фазовым составом: тетрагональная фаза  $\beta\text{-Sn}$  с орторомбической фазой  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  ( $\text{Sn}_{0,65}\text{Ag}_{0,35}$ , магнетронное распыление) и тетрагональная фаза  $\text{SnO}_2$  (касситерит) с гранцентрированной кубической структурой  $\text{Ag}$  ( $\text{SnO}_2(\text{Ag})$ , термическое окисление). Чувствительность  $S$  слоев  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  к метану определялась при  $T = 200\text{--}360^\circ\text{C}$  в атмосфере воздуха с содержанием метана в диапазоне  $C_{\text{CH}_4} = 2000\text{--}20\,000$  ppm. Показано, что импульсная лазерная обработка приводит к увеличению чувствительности  $S$  слоев  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  к метану до 12 % по сравнению с исходными слоями  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$ .

**Ключевые слова:** нанокompозитные слои  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$ , магнетронное распыление, импульсная лазерная обработка, термическое окисление, газочувствительность, метан.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Исследования выполнены в рамках проекта Т22-030 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (№ ГР 20221052), а также частично в рамках проекта Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (проект 3.1.2, № ГР 20212702).

**Для цитирования.** Прокопьев, С. Л. Чувствительность к метану нанокompозитных слоев  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  после импульсного лазерного облучения / С. Л. Прокопьев, П. И. Гайдук // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 2. С. 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-5-13>.

## METHANE SENSITIVITY OF PULSED LASER TREATED $\text{SnO}_2(\text{Ag})$ NANOCOMPOSITE LAYERS

STANISLAU L. PRAKOPYEU, PETER I. GAIDUK

*Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 11.10.2022*

**Abstract.** This paper reports on the gas sensitivity of  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  layers, consequently formed by magnetron sputtering of  $\text{Sn} + \text{Ag}$  target, oxidation of  $\text{Sn}_{0,65}\text{Ag}_{0,35}$  layers at the temperature of  $650^\circ\text{C}$  within 30 min and modified by laser radiation pulses at energy density of  $W = 1.5\text{--}3.2$  J/cm<sup>2</sup>. Using transmission electron microscopy and transmission electron diffraction it was found, that  $\text{Sn}_{0,65}\text{Ag}_{0,35}$  and  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  layers are nanocomposite with average grain size

of 100–150 nm.  $\text{Sn}_{0.65}\text{Ag}_{0.35}$  and  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  layers contain grains of the following phase composition: a tetragonal  $\beta$ -Sn with an orthorhombic  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  ( $\text{Sn}_{0.65}\text{Ag}_{0.35}$ , magnetron sputtering) and a tetragonal  $\text{SnO}_2$  (cassiterite) with a face-centered cubic Ag structure ( $\text{SnO}_2(\text{Ag})$ , thermal oxidation). The sensitivity of  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  layers with respect to 2000–20 000 ppm methane in the air was obtained from sensitivity  $S$  measurements at  $T = 200\text{--}360$  °C. It is shown that pulsed laser annealing of  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  layers results in up to 12 % increase of sensitivity of  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  layers to methane in comparison with the initial  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  layers.

**Keywords:** nanocomposite  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  layers, magnetron sputtering, pulsed laser annealing, thermal oxidation, gas sensitivity, methane.

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

**Gratitude.** Studies carried out within the Belarusian republican foundation for basic research project T22-030 (No GR 20221052) and partially within the framework of SARP project “Photonics and electronics for innovation” (project 3.1.2, No GR 20212702).

**For citation.** Prakopyeu S. L., Gaiduk P. I. (2023) Methane Sensitivity of Pulsed Laser Treated  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  Nanocomposite Layers. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-5-13> (in Russian).

## Введение

Диоксид олова ( $\text{SnO}_2$ ) является полупроводником  $n$ -типа проводимости с шириной запрещенной зоны 3,6 эВ, который нашел широкое применение в оптоэлектронике [1], фотовольтаике [1, 2] и газовой сенсорике [3]. На основе слоев  $\text{SnO}_2$  в серийном производстве освоены различные типы газовых сенсоров для детектирования ряда токсичных и взрывоопасных химических веществ (метана  $\text{CH}_4$ , монооксида азота  $\text{NO}$ , ацетона  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$  и др.). В настоящее время с целью увеличения срока службы и чувствительности таких приборов сенсорные структуры формируют в виде слоев нанокompозитного материала, содержащего, наряду с основным материалом  $\text{SnO}_2$ , легирующие добавки в виде кластеров и нанокристаллов металлов и их соединений [4]. В частности, введение нанокристаллов благородных металлов (Ag, Pt, Au) позволяет увеличивать газовую чувствительность слоев  $\text{SnO}_2$ , а также использовать плазмонные эффекты, в том числе для снижения рабочей температуры газоанализа [5–7]. Последнее обстоятельство является важным при детектировании взрывоопасных газов.

С учетом взаимосвязи структурных и электрофизических свойств сенсорных слоев, для улучшения их структурной однородности и свойств, связанных с переносом носителей заряда, необходимо уменьшать влияние межзеренных границ, играющих роль рекомбинационных ловушек для носителей заряда [8]. В частности, уменьшение скорости рекомбинации приводит к увеличению отношения сигнал/шум и улучшению приборных параметров газочувствительных структур. Равновесные методы формирования газочувствительных слоев, включающие магнетронное распыление композитных структур, термические равновесные обработки в различных средах не всегда позволяют получать необходимые структурно-фазовые состояния с низкой плотностью рекомбинационных ловушек. Вместе с тем известно, что неравновесные методы, в частности импульсная лазерная обработка, в ряде случаев позволяют существенно модифицировать структурно-фазовые состояния слоев нанометровой толщины и, соответственно, их электрофизические характеристики [9, 10]. В статье проведены сравнительные исследования чувствительности к метану нанокompозитных слоев  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  после их термического окисления (ТО) и последующей импульсной лазерной обработки (ИЛО) во взаимосвязи со структурными превращениями, протекающими в указанных нанокompозитных слоях.

## Методика проведения эксперимента

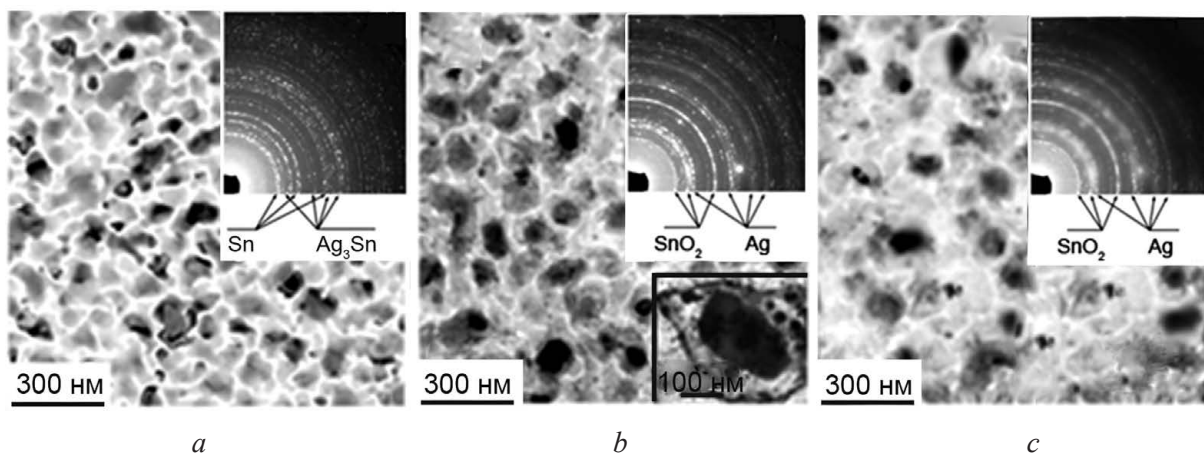
В качестве подложек для осаждения тонких слоев  $\text{Sn}_{0.65}\text{Ag}_{0.35}$  использовались пластинки плавящего кварца размерами  $12 \times 12 \times 0,5$  мм. Условия осаждения тонких слоев  $\text{Sn}_{0.65}\text{Ag}_{0.35}$  методом магнетронного распыления мишени Sn + Ag и режимы последующего ТО приведены в [5]. После ТО часть кварцевых пластинок с тонкими слоями  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  подвергалась ИЛО рубиновым лазером на длине волны  $\lambda = 0,69$  мкм и при длительности лазерного импульса  $\tau = 80$  нс. Диаметр лазерного пучка при ИЛО составлял  $d = 5$  мм. Плотность энергии лазерного излучения при ИЛО варьировалась в диапазоне  $W = 1,5\text{--}3,2$  Дж/см<sup>2</sup>.

Кристаллическая структура, фазовый состав и морфологические свойства осажденных тонких слоев  $\text{Sn}_{0,65}\text{Ag}_{0,35}$  и  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  исследовались методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в режиме светлого поля и просвечивающей электронной дифракции (ПЭД) в планарной геометрии с использованием микроскопа Philips CM20 при ускоряющем напряжении 200 кВ. Образцы со слоями  $\text{Sn}_{0,65}\text{Ag}_{0,35}$  и  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  утонялись для ПЭМ и ПЭД исследований до толщины, обеспечивающей электронную прозрачность. Для этого использовалось химическое травление в смеси концентрированных фтористоводородной (HF) и азотной ( $\text{HNO}_3$ ) кислот ( $\text{HF}:\text{HNO}_3 = 1:5$ ).

Исследование чувствительности к метану тонких слоев  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  проводили как непосредственно после ТО, так и после ТО с последующей ИЛО. Для этого кварцевые пластинки с тонкими слоями  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  нарезали на образцы размерами  $6 \times 6 \text{ мм}^2$ , на которые методом магнетронного распыления наносили Ti контакты в виде встречно направленной гребенчатой структуры, состоящей из пяти полосок размерами  $10 \text{ мкм} \times 3 \text{ мм}$  в каждой из двух частей гребенчатой структуры. Затем для проведения измерения чувствительности к метану образцы на 10 мин помещали в измерительную ячейку, представляющую собой кварцевую трубу, в которой создавалась определенная концентрация метана в воздухе  $C_{\text{CH}_4}$  в диапазоне 2000–20 000 ppm (частей на миллион) и поддерживалась температура  $T = 200\text{--}360 \text{ }^\circ\text{C}$ . Газочувствительность  $S = R_a/R_g$  рассчитывали после измерения электрического сопротивления образцов на воздухе ( $R_a$ ) и в присутствии метана ( $R_g$ ).

### Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены ПЭМ- и ПЭД-микрофотографии слоев  $\text{Sn}_{0,65}\text{Ag}_{0,35}$  как непосредственно после их осаждения, так и после ТО и ИЛО. На светлопольной ПЭМ-микрофотографии (рис. 1, *a*) изображен исходный слой  $\text{Sn}_{0,65}\text{Ag}_{0,35}$  после осаждения. Из анализа рис. 1, *a* следует, что исходный слой  $\text{Sn}_{0,65}\text{Ag}_{0,35}$  состоит из плотно упакованных зерен размером 100–150 нм, имеющих более темный контраст. Как видно из картины ПЭД от выделенной области (вставка в рис. 1, *a*), зерна представляют собой смесь тетрагональной  $\beta\text{-Sn}$  и орторомбической  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  фаз. Форма зерен является полусферической, при этом центральная их область характеризуется наибольшей толщиной (до 40 нм), а периферическая – наименьшей. Анализ микрофотографий ПЭМ в поперечном сечении (здесь не показаны) позволил установить, что средняя толщина исходного слоя  $\text{Sn}_{0,65}\text{Ag}_{0,35}$  составляет около 30 нм. На светлопольной ПЭМ-микрофотографии (рис. 1, *a*) видно, что поперечный размер межзеренных границ значительно меньше размера центральной части зерна и составляет около 2–5 нм. Также в области межзеренных границ присутствуют некоторое количество наноразмерных включений и структурные дефекты.



**Рис. 1.** Светлопольные микрофотографии просвечивающей электронной микроскопии и соответствующие картины просвечивающей электронной дифракции (верхние вставки) слоев сплавов  $\text{Sn}_{0,65}\text{Ag}_{0,35}$  после: *a* – магнетронного распыления; *b* – термического окисления при  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ ; *c* – импульсной лазерной обработки при  $2,3 \text{ Дж/см}^2$ . На нижней вставке в (*b*) приведено увеличенное изображение одной из больших наночастиц Ag

**Fig. 1.** Bright-field micrographs of a transmission electron microscopy and diffraction patterns (top inserts) obtained from a  $\text{Sn}_{0,65}\text{Ag}_{0,35}$  alloy layer after: *a* – magnetron sputtering; *b* – thermal oxidation at  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ ; *c* – pulsed laser annealing at  $2,3 \text{ J/cm}^2$ . Bottom insert in (*b*) – magnified image of one of the large Ag nanoparticles

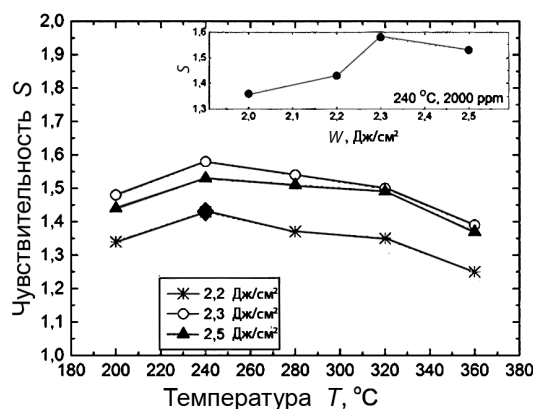
Термическое окисление в атмосфере кислорода при 650 °С в течение 30 мин приводит к окислению Sn и сегрегации Ag с формированием наноразмерных точек и островков (рис. 1, *b*). Окисление Sn подтверждается картиной ПЭД от выделенной области (рис. 1, *b*, вставка), на которой различимы дифракционные кольца, большинство из которых относятся к тетрагональной фазе SnO<sub>2</sub> (касситериту) и к гранецентрированной кубической структуре Ag. Однако на вставке в рис. 1, *b* различимы несколько дополнительных слабых дифракционных максимумов, соответствующих, например,  $d_{hkl} \sim 0,36, 0,29, 0,25, 0,156$  нм и т. д. Эти дифракционные максимумы могут быть обусловлены присутствием орторомбической фазы SnO<sub>2</sub> и, вероятно, гексагональной (4Н) фазы Ag. Гексагональная фаза Ag недавно была обнаружена в слоях, сформированных магнетронным распылением наночастиц Ag, образование которых связано с влиянием размеров наночастиц на их стабильность, что наблюдалось в случае наночастиц размером менее 30 нм [11]. В слоях не обнаружено признаков окисления Ag после термической обработки при 400–800 °С, что согласуется с данными по термодинамике и расчетами значений свободной энергии Гиббса в системе Ag/SnO<sub>2</sub> в зависимости от температуры в диапазоне 200–1000 °С [12].

Таким образом, термическое окисление слоев Sn<sub>0,65</sub>Ag<sub>0,35</sub> приводит к формированию в них нанокомпозитных включений типа «ядро – оболочка» с ядром Ag/SnO<sub>2</sub> и окружающей его оболочкой SnO<sub>2</sub> [5]. Установлено, что процессы сегрегации в ядре Ag/SnO<sub>2</sub> вследствие эффекта Киркендалла приводят к образованию мелких наноточек и крупных островков Ag. При этом оболочка SnO<sub>2</sub> характерна для двух этих типов включений [5]. Результаты исследований методами электронной микроскопии (рис. 1) хорошо коррелируют с результатами проведенных ранее исследований методом спектроскопии обратного рассеяния ионов [5]. Так, в [5] отмечено, что эффективная толщина осажденных слоев Sn<sub>0,65</sub>Ag<sub>0,35</sub> составляет около 31 нм при шероховатости поверхностного слоя примерно 10–15 нм. Кроме того, при термическом окислении при 650 °С в течение 30 мин в атмосфере кислорода происходят перераспределение атомов Sn и Ag по глубине слоя Sn<sub>0,65</sub>Ag<sub>0,35</sub>, окисление Sn и увеличение поверхностной шероховатости.

Импульсная лазерная обработка приводит к заметному изменению структуры слоев. На рис. 1, *c* представлены ПЭМ- и ПЭД-микрофотографии слоев SnO<sub>2</sub>(Ag) после ИЛО с плотностью энергии  $W = 2,3$  Дж/см<sup>2</sup>. На рис. 1, *c* видно, что слои SnO<sub>2</sub>(Ag) после ИЛО так же, как и после ТО (рис. 1, *b*), состоят из хорошо различимых зерен, однако их форма становится более сглаженной, а грани приобретают округлую форму. Из сравнения картин ПЭД после ТО (рис. 1, *b*, вставка) и после ИЛО (рис. 1, *c*, вставка) следует, что фазовый состав слоев SnO<sub>2</sub>(Ag) после ИЛО сохранился прежним, однако вид колец указывает на уменьшение среднего размера зерен в пленке SnO<sub>2</sub>(Ag). Структурные превращения, протекающие в слоях SnO<sub>2</sub>(Ag) при ИЛО (рис. 1, *c*), связаны в первую очередь с их последовательным плавлением и кристаллизацией, причем при плавлении происходит более интенсивное перераспределение атомов преимущественно в периферической области зерен SnO<sub>2</sub>. Необходимо отметить, что при увеличении плотности энергии ИЛО более 2,5 Дж/см<sup>2</sup> на ПЭМ-микрофотографиях отмечалось (здесь не приводится) появление сильно деформированных областей с высоким содержанием структурных дефектов, микротрещин и увеличенной шероховатостью. При этом степень деградации слоев SnO<sub>2</sub>(Ag) увеличивалась с дальнейшим ростом плотности энергии лазерного излучения.

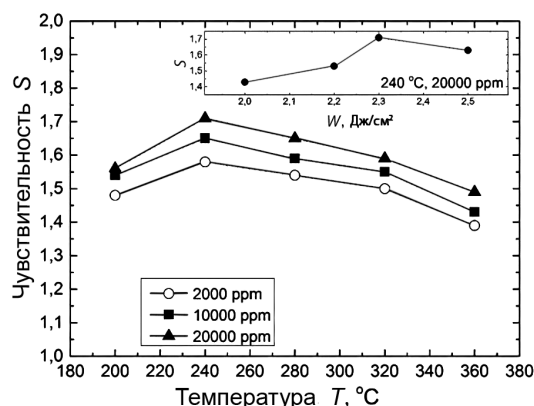
Установлена хорошая корреляция результатов структурно-фазовых исследований и измерений чувствительности слоев SnO<sub>2</sub>(Ag) к газовым средам. Так, на рис. 2 приведены результаты измерения зависимости чувствительности  $S$  от температуры испытаний (200–360 °С) слоев SnO<sub>2</sub>(Ag) после ТО в атмосфере кислорода в течение 30 мин при температуре 650 °С и ИЛО при плотности энергии  $W = 2,2–2,5$  Дж/см<sup>2</sup> и концентрации метана  $C_{CH_4} = 2000$  ppm. На вставке рис. 2 приведена зависимость чувствительности  $S$  от плотности энергии  $W$  ИЛО при концентрации метана  $C_{CH_4} = 2000$  ppm и температуре 240 °С. Для сравнения значком  $\blacklozenge$  обозначена чувствительность к метану слоев SnO<sub>2</sub>(Ag) без ИЛО (согласно [5]). Характер температурной зависимости чувствительности образцов к CH<sub>4</sub> после ИЛО имеет схожие особенности во всем диапазоне плотностей энергии ИЛО. Чувствительность при плотности энергии ИЛО  $W = 2,3$  Дж/см<sup>2</sup> превышает таковую при  $W = 2,2$  Дж/см<sup>2</sup> до 12 % при температуре 240 °С. Более того, средняя чувствительность во всем диапазоне температур (200–360 °С), используемых для измерения чувствительности слоев SnO<sub>2</sub>(Ag) к метану, принимает более высокие значения для образцов после ИЛО при плотности энергии ИЛО  $W = 2,3$  Дж/см<sup>2</sup>, чем для образцов после ИЛО при  $W = 2,5$  Дж/см<sup>2</sup>.





**Рис. 2.** Зависимость чувствительности  $S$  слоев  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  от температуры  $T$  при плотности энергии импульсной лазерной обработки  $W$ , Дж/см<sup>2</sup>:  
 –\*– 2,2; –○– 2,3; –▲– 2,5; ◆ – чувствительность к метану без импульсной лазерной обработки [5];  
 во вставке – зависимость  $S$  от  $W$  при постоянной температуре 240 °C и  $C_{\text{CH}_4} = 2000$  ppm  
**Fig. 2.** Dependence of the sensitivity  $S$  of  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  layers on temperature  $T$  at the energy density of pulsed laser annealing  $W$ , J/cm<sup>2</sup>: –\*– 2.2; –○– 2.3; –▲– 2.5; ◆ – sensitivity to methane without pulsed laser processing [5]; the inset shows the dependence of  $S$  on  $W$  at a constant temperature of 240 °C and of  $C_{\text{CH}_4} = 2000$  ppm

На рис. 3 приведены результаты измерений температурной зависимости чувствительности  $S(T)$  слоев  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  после ИЛО при плотности энергии ИЛО  $W = 2,3$  Дж/см<sup>2</sup> и концентрации метана  $C_{\text{CH}_4}$  в диапазоне 2000–20 000 ppm. На вставке изображена зависимость чувствительности  $S$  от плотности энергии ИЛО при  $C_{\text{CH}_4} = 20\,000$  ppm и температуре 240 °C. На вставке показано, что после ИЛО при  $W = 2,3$  Дж/см<sup>2</sup> и  $T = 240$  °C достигается чувствительность  $S = 1,7$  для концентрации метана  $C_{\text{CH}_4} = 20\,000$  ppm.



**Рис. 3.** Зависимость чувствительности  $S$  слоев  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  от температуры  $T$  при плотности энергии импульсной лазерной обработки  $W = 2,3$  Дж/см<sup>2</sup> для концентрации метана  $C_{\text{CH}_4}$ , ppm: –○– 2000; –■– 10 000; –▲– 20 000; во вставке – зависимость  $S$  от  $W$  при 240 °C и  $C_{\text{CH}_4} = 20\,000$  ppm  
**Fig. 3.** Sensitivity dependence of  $S$  layers of  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  on temperature  $T$  at energy density of pulsed laser annealing  $W = 2.3$  J/cm<sup>2</sup> for methane concentration  $C_{\text{CH}_4}$ , ppm: –○– 2000; –■– 10 000; –▲– 20 000; the inset shows the dependence of  $S$  on  $W$  at 240 °C and  $C_{\text{CH}_4} = 20\,000$  ppm

При интерпретации результатов необходимо принять во внимание, что  $\text{SnO}_2$  имеет высокую оптическую прозрачность для лазерного излучения с  $\lambda = 0,69$  нм [13] по сравнению с непрозрачными и плазмонно-активными нанокристаллами серебра, вследствие чего на начальной стадии импульсного лазерного облучения нагрев слоя  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  происходит в основном за счет поглощения излучения наночастицами Ag. При этом важно учитывать, что температура плавления Ag (962 °C) существенно ниже, чем у  $\text{SnO}_2$  (1630 °C). С учетом неравновесности процесса нагрева наносекундными импульсами, а также низкой теплопроводности на границах зерен  $\text{SnO}_2/\text{Ag}$  с большой долей уверенности можно полагать, что при облучении лазерными импульсами последовательно происходят нагрев нанокристаллов серебра, их плавление, запол-

нение нанопор и межзеренных несплошностей. Эти процессы завершаются рекристаллизацией слоя  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  и соответственно модификацией структуры межзеренных границ. Можно также предположить, что при повышении плотности энергии лазерного излучения общая температура слоя  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  существенно возрастает, что приводит к частичному оплавлению кристаллов  $\text{SnO}_2$ , особенно в периферических (более тонких) областях, а также в местах их соприкосновения с расплавленными областями  $\text{Ag}$ . Таким образом, формирование слоя  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  со структурой, изображенной на рис. 1, с, можно объяснить, с одной стороны, последовательно происходящим плавлением  $\text{Ag}$  и  $\text{SnO}_2$ , а с другой – интенсивным протеканием диффузионных процессов в слоях  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  при передаче тепловой энергии от наночастиц  $\text{Ag}$  к зернам  $\text{SnO}_2$ . В дополнение к этому происходит заполнение жидким  $\text{Ag}$  несплошностей на межзеренных границах  $\text{SnO}_2$ , что приводит к некоторому уменьшению структурных неоднородностей и шероховатости поверхности слоя  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$ .

Сравнение результатов структурных и электрофизических исследований слоев  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  показывает их хорошую корреляцию. Так, структурные несовершенства, несплошности и границы раздела с выраженной шероховатостью в целом являются областями скопления точечных дефектов, дислокаций, дефектов упаковки, атомов примеси, островков загрязнений и др. Очевидно, что эти области содержат оборванные атомные связи различного происхождения в высокой концентрации, которые порождают глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне и играют роль эффективных центров рекомбинации носителей заряда. Следует отметить, что при хемосорбции газов-восстановителей (метан) на сенсорных слоях на основе оксидов металлов ( $\text{SnO}_2$ ) [8, 14, 15] в этих слоях ожидаются генерация свободных электронов и уменьшение электрического сопротивления. Поэтому естественно, что для улучшения газовой чувствительности слоев необходимо уменьшать количество центров рекомбинации в слоях  $\text{SnO}_2$ , т. е. улучшать их структурное качество. В этом случае уменьшение скорости рекомбинации носителей заряда должно сопровождаться улучшением чувствительности сенсорных слоев. Хорошо известно (например, результаты исследований и модельные представления [16, 17]), что в поликристаллических слоях центры рекомбинации локализованы преимущественно в области границ зерен. В предельных случаях, когда плотность центров рекомбинации на границах зерен экстремально высока, они приобретают свойства областей пространственного заряда с высоким электрическим сопротивлением, низкой концентрацией и подвижностью носителей заряда. В случае поликристаллических слоев нанометровой толщины это может приводить к особенно драматическому увеличению их электрического сопротивления [18].

Как следует из результатов ПЭМ-исследований (рис. 1, с), модификация структуры межзеренных границ слоев  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  при ИЛО приводит к уменьшению шероховатости поверхности и к сглаживанию границ зерен. Кроме того, заполнение несплошностей расплавом как таковое вызывает пассивацию оборванных атомных связей на межзеренных границах, а, следовательно, уменьшение количества центров рекомбинации носителей заряда. В этом случае происходит уменьшение скорости рекомбинации носителей заряда и, как следствие, увеличение электрической проводимости слоев  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$ . Действительно, из рис. 2 следует, что чувствительность  $S$  к метану слоев  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  после ИЛО увеличивается на 12 % по сравнению с таковой для слоев  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$  без ИЛО.

Необходимо, однако, отметить, что наряду с улучшением структуры межзеренных границ за счет их оплавления и заполнения пор, мощные лазерные импульсы наносекундной длительности могут приводить к нежелательным механическим напряжениям и деформациям в слоях  $\text{SnO}_2(\text{Ag})$ . Это происходит вследствие кратковременности процесса ИЛО и различия в температурных коэффициентах расширения зерен  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Ag}$  и материала подложки в твердом и расплавленном состояниях. При малых значениях плотности энергии ИЛО механические напряжения, связанные с плавлением отдельных зерен, компенсируются заполнением пор и межзеренных несплошностей. Однако при больших плотностях энергии напряжения становятся настолько высокими, что их релаксация возможна лишь посредством макроскопических деформаций больших участков или даже всего слоя. Как следует из результатов ПЭМ-исследований, ИЛО с плотностью энергии  $W = 2,5 \text{ Дж/см}^2$  и более приводит к деформациям и механическому разрушению локальных областей облучаемого слоя. Таким образом, существование диапазона плотности энергии

ИЛО, в котором имеет место улучшение газовой чувствительности (при  $W$  от 2,0 до 2,3 Дж/см<sup>2</sup>), можно интерпретировать с позиций оптимальности структурно-фазовых изменений. Напротив, ухудшение газовой чувствительности в области  $W = 2,5-3,2$  Дж/см<sup>2</sup> происходит из-за структурной деградации и частичного разрушения слоев SnO<sub>2</sub>(Ag) при сверхпороговых интенсивностях лазерного облучения.

Из анализа рис. 3 следует, что чувствительность  $S$  возрастает непропорционально увеличению концентрации метана. Этот факт можно объяснить нарушением динамического равновесия между процессами адсорбции и десорбции молекул метана при заданной температуре поверхности слоя SnO<sub>2</sub>(Ag). Указанные особенности взаимодействия метана с поверхностью слоя SnO<sub>2</sub>(Ag) подтверждаются, например, представлениями о кинетике взаимодействия газов с поверхностью твердых тел в целом [19]. С учетом этого при достаточно низких температурах (рис. 3) и концентрации метана более 10 000 ppm замедляется скорость его десорбции с поверхности слоев SnO<sub>2</sub>(Ag). Увеличение концентрации метана до 20 000 ppm приводит к дальнейшему замедлению скорости его десорбции при заданной температуре 240 °С. В результате происходит перенасыщение метаном поверхности исследуемого слоя SnO<sub>2</sub>(Ag).

### Заключение

1. Исследована чувствительность к метану слоев SnO<sub>2</sub>(Ag) после импульсной лазерной обработки. Слои SnO<sub>2</sub>(Ag) формировались методом магнетронного распыления мишени Sn + Ag с последующим термическим окислением Sn<sub>0,65</sub>Ag<sub>0,35</sub> в атмосфере кислорода в течение 30 мин при  $T = 650$  °С. Импульсная лазерная обработка слоев SnO<sub>2</sub>(Ag) заключалась в воздействии однократными импульсами с плотностью энергии  $W = 1,5-3,2$  Дж/см<sup>2</sup> на длине волны  $\lambda = 0,69$  мкм при длительности лазерных импульсов 80 нс.

2. Подтверждено формирование слоя SnO<sub>2</sub>(Ag) вследствие термического окисления Sn в слое Sn<sub>0,65</sub>Ag<sub>0,35</sub>, а также сегрегационное перераспределение Ag и Sn в SnO<sub>2</sub>(Ag).

3. Чувствительность слоев SnO<sub>2</sub>(Ag) к метану исследовалась в диапазоне концентраций метана  $C_{\text{CH}_4}$  от 2000 до 20 000 ppm. Импульсная лазерная обработка слоев SnO<sub>2</sub>(Ag) при плотности энергии  $W = 2,3$  Дж/см<sup>2</sup> приводит к увеличению чувствительности к метану до 12 % по сравнению со слоями SnO<sub>2</sub>(Ag) непосредственно после термического окисления.

### Список литературы

1. Pan, S. Recent Progress in p-Type Doping and Optical Properties of SnO<sub>2</sub> Nanostructures for Optoelectronic Device Applications / S. Pan, G. Li // Recent Patents in Nanotechnology. 2011. No 5. P. 138–161. DOI: 10.2174/187221011795909161.
2. Macroporous SnO<sub>2</sub>. Synthesized via a Template-Assisted Reflux Process for Efficient Dye-Sensitized Solar Cells / K.-N. Li [et al.] // Appl. Mater. Interfaces. 2013. No 5. P. 5105–5111. DOI: 10.1021/am4009727.
3. Geckeler, K. E. Functional Nanomaterials / K. E. Geckeler, E. Rosenberg. Valencia: Amer. Sci. Publ., 2005.
4. A Novel Low Temperature Gas Sensor Based on Pt-Decorated Hierarchical 3D SnO<sub>2</sub> Nanocomposites / L. Wang [et al.] // Sensors and Actuators B: Chemical. 2016. No 232. P. 91–101. DOI: 10.1016/j.snb.2016.02.135.
5. Gaiduk, P. I. Plasmonic-Based SnO<sub>2</sub> Gas Sensor with In-Void Segregated Silver Nanoparticles / P. I. Gaiduk // Microel. Eng. 2014. No 125. P. 68–72. DOI: 10.1016/j.mee.2013.11.005.
6. Lee, K.-S. Gold and Silver Nanoparticles in Sensing and Imaging: Sensitivity of Plasmon Response to Size, Shape, and Metal Composition / K.-S. Lee, M. A. El-Sayed // J. Phys. Chem. B. 2006. Vol. 110, No 39. P. 19220–19225. DOI: 10.1021/jp062536y.
7. Nanostructured Materials for Room-Temperature Gas Sensors / J. Zhang [et al.] // Adv. Mater. 2016. Vol. 28, No 5. P. 795–831. DOI: 10.1002/adma.201503825.
8. Dey, A. Semiconductor Metal Oxide Gas Sensors: a Review / A. Dey // Materials Science and Engineering. B. 2018. No 229. P. 206–217. DOI: 10.1016/j.mseb.2017.12.036.
9. Electrical Properties for Poly-Ge Films Fabricated by Pulsed Laser Annealing / H. Watakabe [et al.] // Thin Solid Films. 2006. Vol. 508, No 1–2. P. 315–317. DOI: 10.1016/j.tsf.2005.08.393.
10. Pulsed Laser Annealing of Semiconductor Structures for Functional Devices / N. Misra [et al.] // Phys. Stat. Sol. (c) 2008. Vol. 5, No 10. P. 3264–3270. DOI: 10.1002/pssc.200779506.

11. Observation of a Hexagonal (4H) Phase in Nanocrystalline Silver / P. Taneja [et al.] // *Phys. Rev. B*. 2001. No 64. P. 033405. DOI: 10.1103/PhysRevB.64.033405.
12. Interface Structure of Ag/SnO<sub>2</sub> Nanocomposite Fabricated by Reactive Synthesis / J. Chen [et al.] // *J. Mater. Sci. Technol.* 2010. No 26. P. 49–55. DOI: 10.1016/S1005-0302(10)60008-4.
13. Bhagavat G. K. Electrical and Photovoltaic Properties of Tin Oxide Silicon Heterojunctions / G. K. Bhagavat, K. B. Sundaram // *Thin Solid Films*. 1979. No 63. P. 197–201. DOI: 10.1016/0040-6090(79)90126-3.
14. Гаман, В. И. Физика полупроводниковых газовых сенсоров / В. И. Гаман. Томск: Изд-во НТЛ, 2012.
15. Shimizu, Y. Basic Aspects and Challenges of Semiconductor Gas Sensors / Y. Shimizu, M. Egashira // *MRS Bulletin*. 1999. Vol. 24, No 6. P. 18–24. DOI: 10.1557/S0883769400052465.
16. Kamins, T. I. Hall Mobility in Chemically Deposited Polycrystalline Silicon / T. I. Kamins // *J. of Appl. Phys.* 1971. No 42. P. 4357–4365. DOI: 10.1063/1.1659780.
17. Correlation between the Microscopic and Macroscopic Characteristics of SnO<sub>2</sub> Thin Film Gas Sensors / A. Lopes [et al.] // *International Journal of Inorganic Materials*. 2001. Vol. 3, No 8. P. 1349–1351. DOI: 10.1016/S1466-6049(01)00160-X.
18. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. СПб.: Лань, 2001.
19. Иоффе, И. И. Инженерная химия гетерогенного катализа / И. И. Иоффе, Л. М. Письмен. Л.: Химия, 1972.

## References

1. Pan S., Li G. (2011) Recent Progress in p-Type Doping and Optical Properties of SnO<sub>2</sub> Nanostructures for Optoelectronic Device Applications. *Recent Patents in Nanotechnology*. 5, 138–161. DOI: 10.2174/187221011795909161.
2. Li K.-N., Wang Y.-F., Xu Y.-F., Chen, H.-Y., Su C.-Y., Kuang D.-B. (2013) Macroporous SnO<sub>2</sub>. Synthesized via a Template-Assisted Reflux Process for Efficient Dye-Sensitized Solar Cells. *Appl. Mater. Interfaces*. 5, 5105–5111. DOI: 10.1021/am4009727.
3. Geckeler K. E., Rosenberg E. (2005) *Functional Nanomaterials*. Valencia, Amer. Sci. Publ.
4. Wang L., Wang Y., Yu K., Wang S., Zhang Y., Wei C. (2016) A Novel Low Temperature Gas Sensor Based on Pt-Decorated Hierarchical 3D SnO<sub>2</sub> Nanocomposites. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 232, 91–101. DOI: 10.1016/j.snb.2016.02.135.
5. Gaiduk P. I. (2014) Plasmonic-Based SnO<sub>2</sub> Gas Sensor with In-Void Segregated Silver Nanoparticles. *Microel. Eng.* 125, 68–72. DOI: 10.1016/j.mee.2013.11.005.
6. Lee K.-S., El-Sayed M. A. (2006) Gold and Silver Nanoparticles in Sensing and Imaging: Sensitivity of Plasmon Response to Size, Shape, and Metal Composition. *J. Phys. Chem. B*. 110 (39), 19220–19225. DOI: 10.1021/jp062536y.
7. Zhang J., Liu X., Neri G., Pinna N. (2016) Nanostructured Materials for Room-Temperature Gas Sensors. *Adv. Mater.* 28 (5), 795–831. DOI: 10.1002/adma.201503825.
8. Dey A. (2018) Semiconductor Metal Oxide Gas Sensors: a Review. *Materials Science and Engineering. B*. 229, 206–217. DOI: 10.1016/j.mseb.2017.12.036.
9. Watakabe H., Sameshima T., Kanno H., Miyao M. (2006) Electrical Properties for Poly-Ge Films Fabricated by Pulsed Laser Annealing. *Thin Solid Films*. 508 (1–2), 315–317. DOI: 10.1016/j.tsf.2005.08.393.
10. Misra N., Xu L., Rogers M. S., Ko S. H., Grigoropoulos C. P. ((c)2008) Pulsed Laser Annealing of Semiconductor Structures for Functional Devices. *Phys. Stat. Sol.* 5 (10), 3264–3270. DOI: 10.1002/pssc.200779506.
11. Taneja P., Banerjee R., Ayyub P., Dey G. K. (2001) Observation of a Hexagonal (4H) Phase in Nanocrystalline Silver. *Phys. Rev. B*. 64, 033405. DOI: 10.1103/PhysRevB.64.033405.
12. Chen J., Feng J., Xiao B., Zhang K. H., Du Z. P., Hong Z. J., Zhou R. (2010) Interface Structure of Ag/SnO<sub>2</sub> Nanocomposite Fabricated by Reactive Synthesis. *J. Mater. Sci. Technol.* 26, 49–55. DOI: 10.1016/S1005-0302(10)60008-4.
13. Bhagavat G. K., Sundaram K. B. (1979) Electrical and Photovoltaic Properties of Tin Oxide Silicon Heterojunctions. *Thin Solid Films*. 63, 197–201. DOI: 10.1016/0040-6090(79)90126-3.
14. Gaman V. I. (2012) *Physics of Semiconductor Gas Sensors*. Tomsk, Publishing House of Scientific and Technical Literature (in Russian).
15. Shimizu Y., Egashira M. (1999) Basic Aspects and Challenges of Semiconductor Gas Sensors. *MRS Bulletin*. 24 (6), 18–24. DOI: 10.1557/S0883769400052465.
16. Kamins T. I. (1971) Hall Mobility in Chemically Deposited Polycrystalline Silicon. *J. of Appl. Phys.* 42, 4357–4365. DOI: 10.1063/1.1659780.

17. Lopes A., Fortunato E., Nunes P., Vilarinho P., Martins R. (2001) Correlation between the Microscopic and Macroscopic Characteristics of SnO<sub>2</sub> Thin Film Gas Sensors. *International Journal of Inorganic Materials*. 3 (8), 1349–1351. DOI: 10.1016/S1466-6049(01)00160-X.
18. Pasyukov V. V., Sorokin V. S. (2001) *Materials of Electronic Engineering*. Saint Petersburg, Publ. (in Russian).
19. Ioffe I. I., Pismen L. M. (1972) *Engineering Chemistry of Heterogeneous Catalysis*. Leningrad, Khimiya Publ. (in Russian).

### **Вклад авторов**

Авторы внесли равный вклад в написание статьи.

### **Authors' contribution**

The authors contributed equally to the writing of the article.

### **Сведения об авторах**

**Прокопьев С. Л.**, старший преподаватель кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета

**Гайдук П. И.**, д. ф.-м. н., профессор кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета

#### **Адрес для корреспонденции**

220064, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Курчатова, 5  
Белорусский государственный университет  
Тел.: +375 29 276-16-90  
E-mail: prokopyev@bsu.by  
Прокопьев Станислав Леонидович

### **Information about the authors**

**Prakopyeu S. L.**, Senior Lecturer at the Department of Physical Electronics and Nanotechnology of the Belarusian State University

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

#### **Address for correspondence**

220064, Republic of Belarus,  
Minsk, Kurchatova St., 5  
Belarusian State University  
Tel.: +375 29 276-16-90  
E-mail: prokopyev@bsu.by  
Prakopyeu Stanislau Leanidavich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-14-20>

Оригинальная статья  
*Original paper*

УДК 538.91, 539.143.5

## РЕЗИСТОРНАЯ МОДЕЛЬ СЛОИСТЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

ВАН ТУНГ ФАМ, Е. Б. ЧУБЕНКО, В. Е. БОРИСЕНКО

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

*Поступила в редакцию 12.10.2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Предлагается электрические свойства пленочных структур, состоящих из двумерных слоев, образованных нанокристаллическими зернами полупроводника, моделировать эквивалентной схемой. В данной схеме соединенные определенным образом резисторы показывают сопротивление токопроводящих каналов в металлических контактах к ним, материала зерен, межзеренных и межслоевых потенциальных барьеров. Численным моделированием установлено, что распределение тока по площади контактов существенно неоднородно. Плотность тока на периферии контактов может в 3–6 раз превышать этот показатель в их центре. Величины же локальных токов и их распределение по объему слоистых пленок зависят от их зернистости, количества слоев и электронных свойств потенциальных барьеров между зернами и слоями.

**Ключевые слова:** моделирование, слоистая пленка, эквивалентная схема, резистор, потенциальный барьер, нитрид углерода, нанокристалл.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Авторы признательны А. Л. Данилюку за полезное обсуждение предложенной модели и результатов расчетов по ней. Работа выполнена в рамках проекта БРФФИ Ф22-114.

**Для цитирования.** Ван Тунг Фам. Резисторная модель слоистых пленочных структур / Ван Тунг Фам, Е. Б. Чубенко, В. Е. Борисенко // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 2. С. 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-14-20>.

## RESISTOR MODEL OF LAYERED FILM STRUCTURES

VAN TUNG PHAM, EVGENY B. CHUBENKO, VICTOR E. BORISENKO

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

*Submitted 12.10.2022*

**Abstract.** Electric properties of film structures consisting of two-dimensional layers, composed by nanocrystalline grains of a semiconductor are proposed to be modeled with an equivalent scheme, in which resistors indicate electrical resistance of current channels in metallic contacts, grain material, potential barriers between grains and layers. Numerical simulation within the model has shown that there is a nonuniform current distribution over the area of the contacts. Current density at their edges can be 3–6 times higher than in the center. Local currents and their distribution in the film bulk are determined by the grain structure of the film, number of the layers, electronic properties of the barriers between grains and layers.

**Keywords:** modeling, layered film, equivalent scheme, resistor, potential barrier, carbon nitride, nanocrystal.

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

**Gratitude.** The authors thank A. L. Daniluk for fruitful discussion of the proposed model and numerical results obtained. The work was performed within the grant BRFFR F22-114.

**For citation.** Van Tung Pham, Chubenko E. B., Borisenko V. E. (2023) Resistor Model of Layered Film Structures. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-14-20> (in Russian).

## Введение

Открытие на примере графена [1] принципиальной возможности получать и использовать в электронике, фотонике, фотокатализе двумерные (2D) слоистые структуры стимулировало исследования аналогичных по структуре материалов. Их перечень быстро пополнили дихалькогениды переходных металлов, нитрид бора, графитоподобный нитрид углерода ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ) и другие материалы с гексагональной кристаллической решеткой [2, 3]. Большинство этих материалов проявляют полупроводниковые свойства в объемном состоянии. В плоскости слоев таких материалов соседние атомы образуют достаточно сильные, обычно ковалентные связи, в то время как между отдельными слоями мономолекулярной толщины действуют слабые силы Ванн-дер-Вальса. Это определяет электронные, оптические, механические и прочие свойства данных структур. Управление ими представляет актуальную задачу.

Цель проведенных исследований – развитие представлений о протекании электрического тока в многослойных пленочных структурах путем их моделирования с использованием резисторов. При этом впервые учтено наличие отличающихся по электрическим свойствам межзеренных границ в плоскости слоев и межслойных границ, образующих потенциальные барьеры для подвижных носителей заряда.

## Модель слоистых пленочных структур

Моделируемая слоистая пленочная структура в двумерном представлении показана на рис. 1. В данной резисторной модели используются два типа блоков: проводящий и изолирующий. Проводящие блоки будут работать как резистор с низким сопротивлением, а изолирующие – как резистор с высоким сопротивлением. Предполагается, что все слои структуры состоят из ориентированных в плоскости контактирующих друг с другом монокристаллических зерен полупроводника. На их границах из-за нарушения периодичности расположения собственных атомов материала или адсорбции примесей образуются межзеренные потенциальные барьеры, влияющие на протекание электрического тока в плоскости каждого слоя.

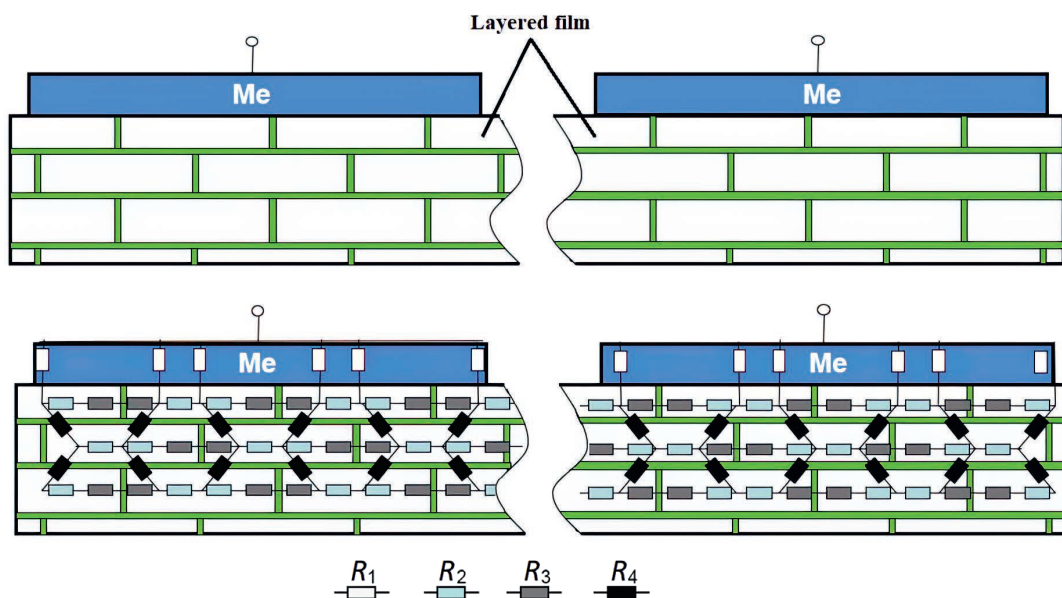


Рис. 1. Слоистая пленочная структура с межзеренными и межслойными границами и ее эквивалентная электрическая схема

Fig. 1. A layered film structure with intergrain and interlayer boundaries and its equivalent electrical circuit

Было принято, что все зерна в слое имеют одинаковую толщину, вследствие чего межслойные границы, возникающие за счет взаимного смещения слоев и возможной адсорбции примесей, оказываются параллельными поверхности пленки. Качественное подтверждение обоснованности таких представлений получено при анализе поперечного сечения многослойных пленок  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ , сформированных методом химического осаждения из газовой фазы как на аморфных стеклянных, так и на монокристаллических кремниевых подложках [4]. Электрические свойства каждого типа границ принимали одинаковыми во всей структуре. Протекание тока в рассматриваемой структуре анализировали в плоскости пленки, используя омические контакты из проводника (Me) на ее поверхности. В этом случае подложку считали изолирующей. Анализ протекания тока перпендикулярно плоскости пленки проводили в предположении хороших токопроводящих свойств подложки и наличия к ней омического контакта.

Предлагаемая эквивалентная схема моделируемой многослойной пленочной структуры (рис. 1) построена из резистивных элементов, отражающих:  $R_1$  – сопротивление токопроводящих каналов из металлического контакта в первый поверхностный слой пленки (предполагается, что количество таких каналов равно  $2n$ , где  $n$  – количество монокристаллических зерен полупроводника, контактирующих с металлическим контактом);  $R_2$  – сопротивление материала кристаллического зерна;  $R_3$  – сопротивление межзеренного барьера;  $R_4$  – сопротивление межслойного барьера. Межзеренные и межслойные барьеры считали симметричными по своим электрическим свойствам. Сопротивления межслойного барьера  $R_4$  и зерна  $R_2$  выбирали равными половинам соответствующих полных величин для учета перекрытия зерен в соседних слоях. В первом приближении все названные сопротивления не зависели ни от приложенного к ним напряжения, ни от протекающего через них тока.

Расчет токов, протекающих через элементы предложенной эквивалентной схемы, осуществляли в программном комплексе Micro-Cap 12. При этом, опираясь на оценки электрических свойств полупроводников и полупроводниковых наноструктур, принимали  $R_1 = 0,01$  Ом,  $R_2 = 10,0$  кОм. Количество каналов проводимости  $n$  с сопротивлением  $R_1$  между металлическим контактом и пленкой изменяли от 2 до 12. Для оценки роли межзеренных и межслойных барьеров сопротивления  $R_3$  и  $R_4$  задавали равными 100, 200 и 300 кОм в сочетаниях, обеспечивающих  $R_3 < R_4$ ,  $R_3 = R_4$  или  $R_3 > R_4$ . Количество межзеренных границ в одном слое между двумя поверхностными контактами принимали равным 14, а количество слоев  $N$  в пленке изменяли от 1 до 12. Расчеты выполняли для фиксированного постоянного напряжения 10 В между двумя поверхностными контактами при протекании тока в плоскости пленки или между поверхностным контактом и проводящей подложкой при протекании тока перпендикулярно плоскости пленки.

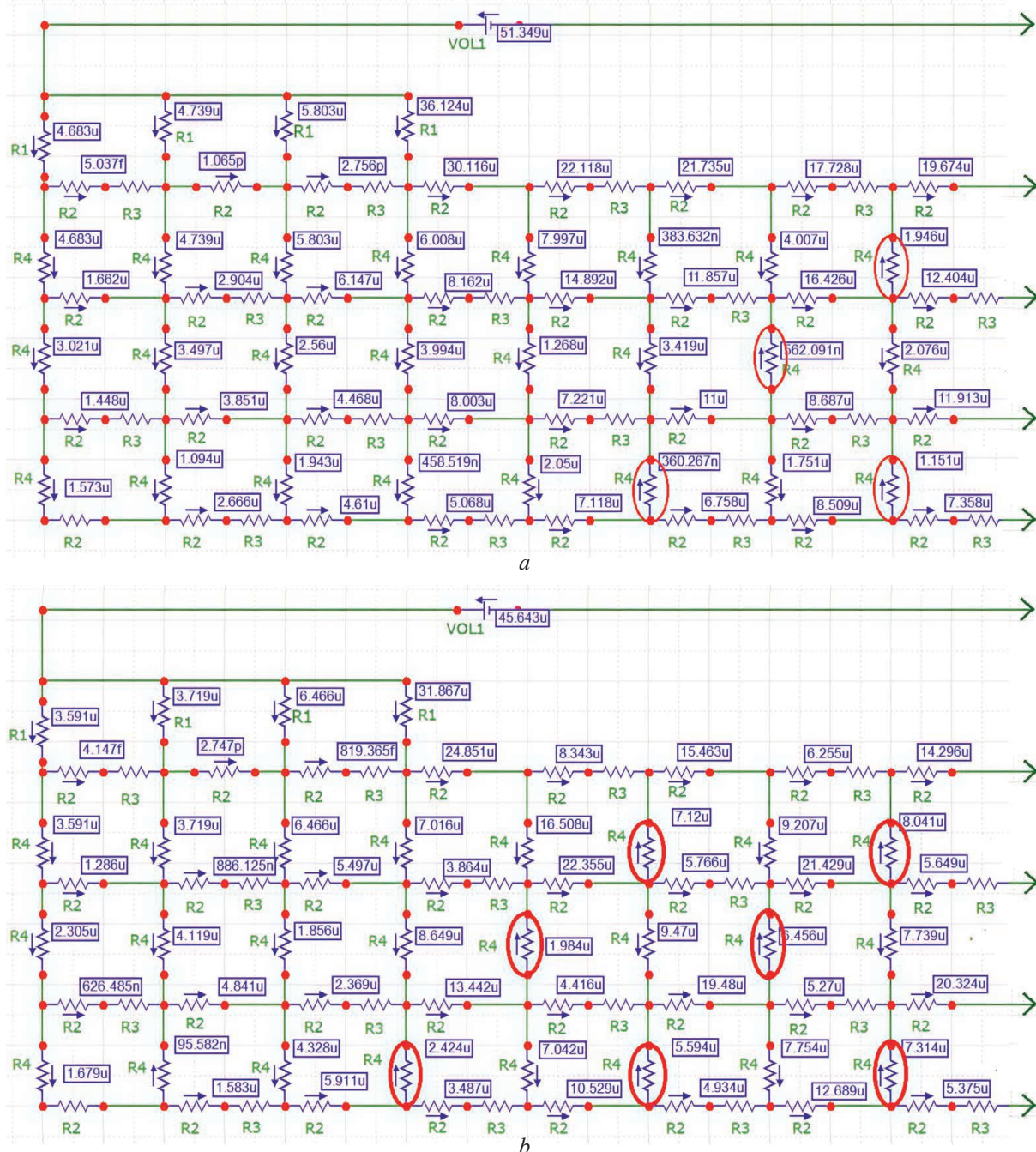
### Результаты исследований и их обсуждение

Ввиду заложенной в модели симметричности электрических свойств всех элементов многослойной пленки, рассчитанные величины протекающих через них токов не зависели от полярности приложенного к контактам напряжения. Распределение токов в многослойной пленке под и вблизи поверхностного контакта к ней при приложении напряжения между двумя поверхностными контактами иллюстрирует рис. 2. Токи в горизонтальных цепях указывают направление, в котором располагается второй, не показанный на рисунке, контакт. Величины и направления токов при приложении напряжения между двумя поверхностными контактами приобретают особенности, связанные с влиянием как межзеренных (через  $R_3$ ), так и межслоевых барьеров (через  $R_4$ ).

В распределении токов заметны две характерные особенности. Во-первых, максимальный ток через контакт протекает со стороны, ближайшей ко второму поверхностному контакту. Величина этого тока в пять-шесть раз больше тока, проходящего через соседние со стороной области. Во-вторых, направления протекания межслойных токов могут отличаться в соседних областях, как это отмечено на рис. 2. Причем количество каналов с инверсным протеканием тока увеличивается при сопротивлении межзеренных барьеров, превышающем сопротивление межслойных барьеров ( $R_3 < R_4$ ).

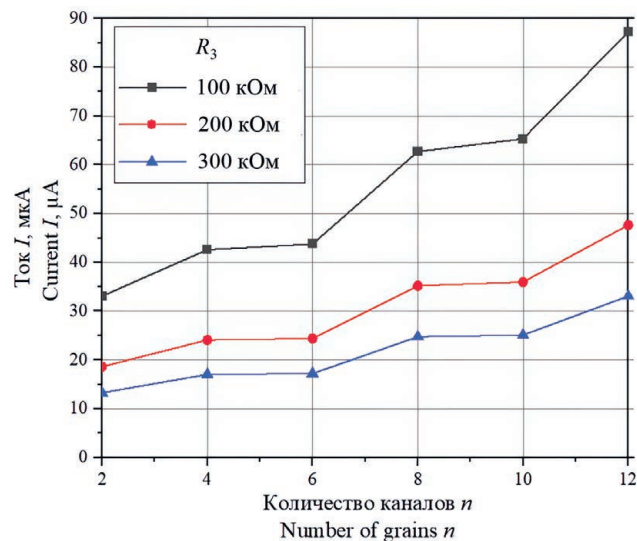
В самой пленке, как можно было и ожидать, наибольший ток протекает в первом поверхностном слое. Расчетные данные, приведенные на рис. 3, показывают, что его величина существенно зависит как от межзеренного сопротивления  $R_3$ , так и от количества каналов проводимости  $n$ , по которым носители заряда попадают из контакта в этот слой.



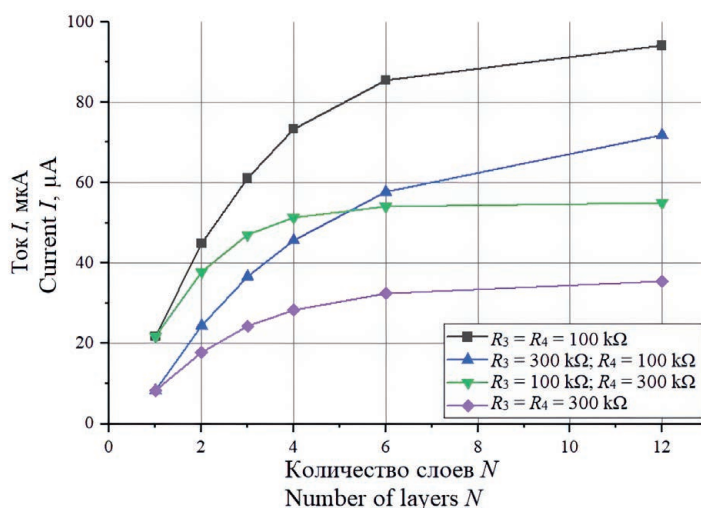


**Рис. 2.** Распределение токов в области одного из контактов к трехслойной пленке с 12 межзеренными границами в каждом слое при наличии четырех каналов поступления носителей заряда из контакта с сопротивлением  $R_1$  и приложении 10 В между двумя поверхностными контактами: *a* –  $R_2 = 10$  кОм,  $R_3 = 100$  кОм,  $R_4 = 300$  кОм; *b* –  $R_2 = 10$  кОм,  $R_3 = 300$  кОм,  $R_4 = 100$  кОм ( $\mu = \mu\text{A}$ ;  $\text{n} = \text{nA}$ ;  $\text{p} = \text{pA}$ ;  $\text{f} = \text{fA}$ )  
**Fig. 2.** Current distribution around one of the contacts to three-layers film with 12 intergrain boundaries in each layer and 4 channels for charge carrier from the contact with resistance initiated  $R_1$  by 10 V bias between two surface contacts: *a* –  $R_2 = 10$  k $\Omega$ ,  $R_3 = 100$  k $\Omega$ ,  $R_4 = 300$  k $\Omega$ ; *b* –  $R_2 = 10$  k $\Omega$ ,  $R_3 = 300$  k $\Omega$ ,  $R_4 = 100$  k $\Omega$  ( $\mu = \mu\text{A}$ ,  $\text{n} = \text{nA}$ ,  $\text{p} = \text{pA}$ ,  $\text{f} = \text{fA}$ )

Поскольку величина  $n$  коррелирует с количеством кристаллических зерен материала пленки, находящихся под контактом, можно заключить, что зернистость пленки является важным фактором, контролирующим ток в поверхностном слое. В слоях, лежащих под поверхностным слоем, величины протекающих токов уменьшаются в несколько раз. Тем не менее по мере увеличения количества слоев  $N$  общий ток возрастает и достигает насыщения при  $N = 6\text{--}12$ , как это видно из рис. 4. Следует отметить, что в случае однослойного материала резисторы  $R_4$  в эквивалентную схему не включаются, а, следовательно, не влияют на протекающий ток.

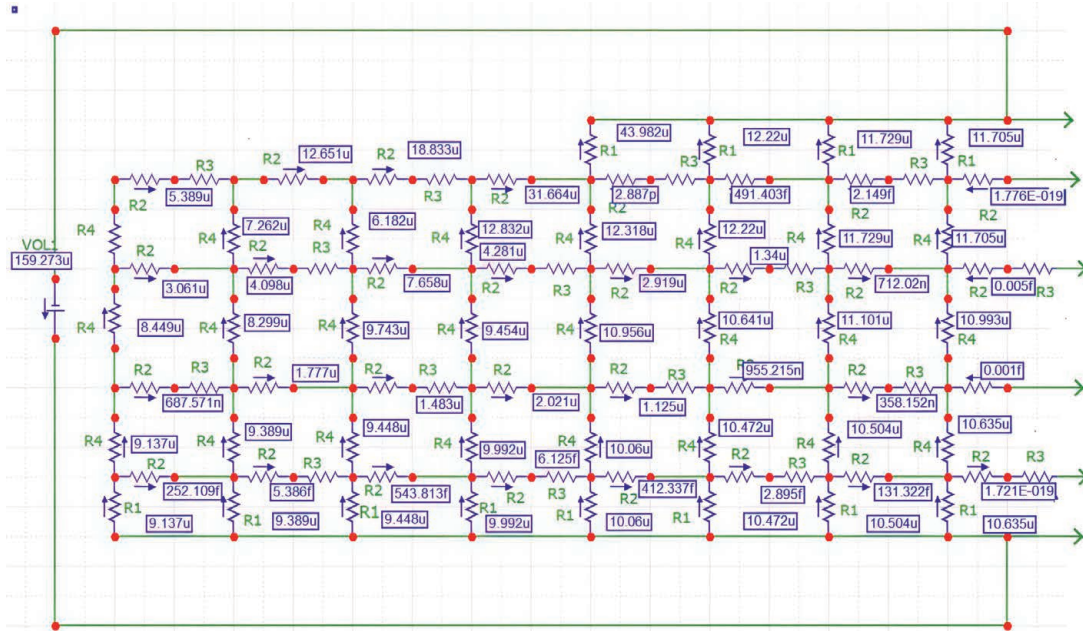


**Рис. 3.** Зависимость величины тока, протекающего в первом поверхностном слое четырехслойной пленки, от  $n$  с сопротивлением  $R_1$  между металлическим контактом и пленкой при различных сопротивлениях  $R_3$  и напряжении 10 В, приложенном между двумя поверхностными контактами ( $R_4 = 200 \text{ k}\Omega$ )  
**Fig. 3.** Dependence of current flowing in the first surface layer of a four-layers film as a function of the number of  $n$  conducting channels with the resistance  $R_1$  between metallic contact and the film with different intergrain resistances  $R_3$  and 10 V bias between two surface contacts ( $R_4 = 200 \text{ k}\Omega$ )



**Рис. 4.** Зависимость общего тока, протекающего в плоскости слоистой пленки, от количества слоев  $N$  при напряжении 10 В для различных  $R_3$  и  $R_4$   
**Fig. 4.** The current flowing in the plane of the layered film as a function of the number of layers  $N$  at 10 V for different  $R_3$  and  $R_4$

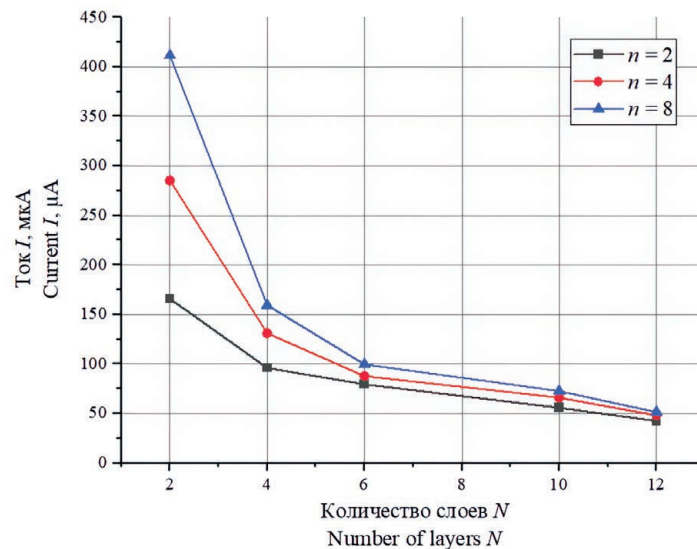
Значение тока насыщения зависит как от абсолютных значений  $R_3$  и  $R_4$ , так и от их соотношения. Очевидно, что при  $R_3 > R_4$ , по сравнению со случаем  $R_3 < R_4$ , большее количество слоев включается в перенос носителей заряда, создавая параллельные каналы для протекания тока. Это не только приводит к возрастанию тока насыщения, но и делает само насыщение с увеличением количества слоев менее выраженным. Величина тока, протекающего перпендикулярно плоскости пленки, т. е. при приложении напряжения между поверхностным контактом и токопроводящей подложкой, контролируется исключительно величиной межслоевого сопротивления  $R_4$  и уменьшается с увеличением количества слоев. Распределение токов в такой структуре показано на рис. 5. Как и в случае протекания тока в плоскости пленки, наибольшая его часть приходится на периферийную область верхнего контакта. Здесь его величина в несколько раз больше, чем в центральной области этого контакта.



**Рис. 5.** Распределение токов в области шестислойной пленки при наличии восьми каналов поступления носителей заряда из контакта с сопротивлением  $R_1$  и приложении 10 В между двумя контактами ( $R_2 = 10$  кОм,  $R_3 = 100$  кОм,  $R_4 = 300$  кОм); u, n, p, f – то же, что на рис. 2

**Fig. 5.** Current distribution in the region of a six-layers film with 8 channels for charge carriers to enter from the top contact with resistance  $R_1$  and 10 V between two contacts ( $R_2 = 10$  k $\Omega$ ,  $R_3 = 100$  k $\Omega$ ,  $R_4 = 300$  k $\Omega$ ); u, n, p, f – the same as Fig. 2

Общий же ток зависит, главным образом, от количества токопроводящих каналов  $n$  и количества слоев  $N$  в пленке, как это проиллюстрировано на рис. 6.



**Рис. 6.** Зависимость тока, протекающего перпендикулярно плоскости пленки ( $R_2 = 10$  кОм,  $R_3 = 100$  кОм,  $R_4 = 300$  кОм), от  $N$  при различных  $n$

**Fig. 6.** Current flowing perpendicular to the film plane ( $R_2 = 10$  k $\Omega$ ,  $R_3 = 100$  k $\Omega$ ,  $R_4 = 300$  k $\Omega$ ) in dependence on the number  $N$  for different numbers  $n$

Обращает на себя внимание и боковое растекание тока в областях пленки, лежащих за пределами вертикальной проекции на них верхнего контакта. Размер этих областей зависит от зернистости пленки, коррелирующей с  $n$ , и количества слоев  $N$  в ней.

## Заключение

Расчеты, проведенные в рамках предложенной резисторной модели, процесса токопереноса в пленках, состоящих из двумерных слоев, образованных нанокристаллическими зернами полупроводника, показали, что наибольшую плотность тока следует ожидать на периферии контактов к ним. В этой связи контакты круглой формы или, по крайней мере, со скругленными краями, являются наиболее предпочтительными для практического использования. Величины же токов и их распределение по объему таких пленок существенно зависят от их зернистости, количества слоев и электронных свойств межзеренных и межслоевых потенциальных барьеров. Представление этих барьеров нелинейными элементами эквивалентной схемы позволит сделать следующий шаг в определении и понимании статических и динамических электрических свойств такого рода структур.

## References

1. Novoselov K. S. (2005) Two-Dimensional Atomic Crystals. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 102 (30), 10451–10453. DOI: 10.1073/pnas.0502848102.
2. Wang Y., Wang L., Zhang X., Liang X., Feng Y., Feng W. (2021) Two-Dimensional Nanomaterials with Engineered Bandgap: Synthesis, Properties, Applications. *Nano Today.* 37 (101059). DOI: 10.1016/j.nantod.2020.101059.
3. Wang Y., Liu L., Ma T., Zhang Y., Huang H. (2021) 2D Graphitic Carbon Nitride for Energy Conversion and Storage. *Adv. Funct. Mater.* 31 (34), 2102540 (36 pages). DOI: 10.1002/adfm.202102540.
4. Chubenko E. B., Kovalchuk N. G., Komissarov I. V., Borisenko V. E. (2022) Chemical Vapor Deposition of 2D Crystallized  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  Layered Films. *J. Phys. Chem. C.* 126 (9), 4710–4714. DOI: 10.1021/acs.jpcc.1c10561.

## Вклад авторов / Authors' contribution

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

### Сведения об авторах

**Ван Тунг Фам**, аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Чубенко Е. Б.**, к. т. н., доцент, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Борисенко В. Е.**, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
E-mail: v.tu2103@gmail.com  
Ван Тунг Фам

### Information about the authors

**Van Tung Pham**, Postgraduate at the Department of Micro- and Nanoelectronics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Chubenko E. B.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Borisenko V. E.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics of the 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 Radio Electronics  
E-mail: v.tu2103@gmail.com  
Van Tung Pham



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-21-26>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.794.61

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СВОЙСТВА ГИДРИРОВАННОГО ГРАФЕНА

В. В. МУРАВЬЁВ, В. Н. МИЩЕНКО

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

*Поступила в редакцию 20.07.2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Графен рассматривается в настоящее время как один из наиболее перспективных материалов для создания новых полупроводниковых приборов для различных диапазонов частот. Путем моделирования из первых принципов (ab initio метод) исследовано влияние внешнего электрического поля на свойства зонной диаграммы материала графана, который является модификацией графена при использовании атомов водорода. Установлено, что приложенное к структуре графана внешнее электрическое поле приводит к существенному изменению его зонных диаграмм, которое связано с изменением их типа. При малых значениях напряженности внешнего электрического поля, приблизительно до 0,3 а.е. (1 а.е.  $\approx 51,4 \cdot 10^{10}$  В/м), наблюдаются зонные диаграммы графана с прямым минимальным зазором для долины Г между зоной проводимости и валентной зоной. С дальнейшим увеличением напряженности внешнего электрического поля зонные диаграммы демонстрируют не прямой минимальный зазор. При еще больших значениях напряженности внешнего электрического поля, которые превышают 0,8 а.е., зонные диаграммы графана приобретают вид, свойственный металлическим структурам. Полученные зависимости и параметры графана могут служить основой для создания новых гетероструктурных приборов, содержащих слои графена и других полупроводниковых материалов.

**Ключевые слова:** графен, графан, моделирование, зонная диаграмма, полупроводниковая структура.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Муравьев, В. В. Влияние электрического поля на свойства гидрированного графена / В. В. Муравьев, В. Н. Мищенко // Доклады БГУИР. 2023. 21 (2). С. 21–26. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-21-26>.

## INFLUENCE OF THE ELECTRIC FIELD ON THE PROPERTIES OF HYDROGENATED GRAPHENE

VALENTIN V. MURAVYOV, VALERY N. MISHCHENKA

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

*Submitted 20.07.2022*

**Abstract.** Graphene is currently considered as one of the most promising materials for the creation of new semiconductor devices for various frequency ranges. The influence of an external electric field on the properties of the band diagram of the graphene material, which is a modification of graphene using hydrogen atoms, was studied by simulating from the first principles (ab initio method). It was found that an external electric field applied to the graphene structure leads to a substantial change in its band diagrams, which is associated with a change in their type. At small values of external electric field strength, approximately up to 0.3 a.u. (1 a.u.  $\approx 51.4 \cdot 10^{10}$  V/m), we observe graphene zone diagrams with straight minimal gap for  $\Gamma$  valley between conduction and valence

zones. With further increase in external electric field strength the zone diagrams show indirect minimal gap. With even higher values of external electric field strength, which exceed 0.8 a.u., graphane band diagrams take on a form peculiar to metallic structures. These dependences and the resulting graphene parameters could be the basis for new heterostructure devices containing layers of graphene and other semiconductor materials.

**Keywords:** graphene, graphane, modeling, zone diagram, semiconductor structure.

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

**For citation.** Muravyov V. V., Mishchenka V. N. (2023) Influence of the Electric Field on the Properties of Hydrogenated Graphene. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 21–26. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-21-26> (in Russian).

## Введение

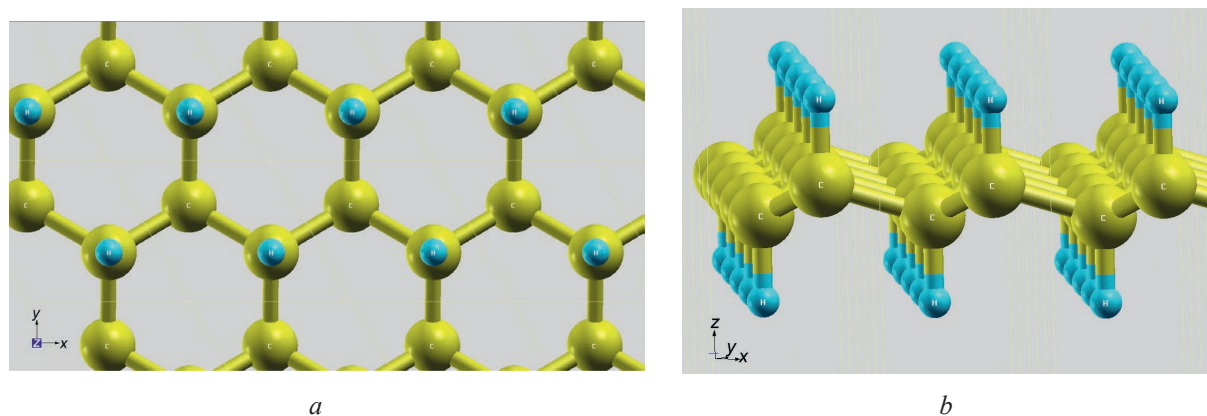
Графен стал предметом многих исследований благодаря своим особым механическими, электрическим и другими свойствам [1]. Но его использование в полупроводниковой электронике выявляет недостатки, связанные с отсутствием зазора между валентной зоной и зоной проводимости в зонной диаграмме. Химическая модификация графена под названием графан – возможное решение этой проблемы [2–5]. Графан – это соединение, состоящее из двумерного графена, ковалентно связанного с атомами водорода. Графан является полупроводником, который имеет новую структуру и низкую размерность. Он представляет собой перспективную основу для фундаментальных исследований и возможных технологических приложений при создании разнообразных электронных приборов.

В статье путем моделирования из первых принципов (ab initio метод) исследовано влияние внешнего электрического поля на свойства гидрированного графена.

## Метод и особенности моделирования свойств гидрированного графена

Моделирование из первых принципов выполняли с помощью программного комплекса Quantum Espresso, используя ряд известных функционалов Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE), HSE, GAUПBE и обобщенное градиентное приближение вида GGA [6]. Применяли следующие параметры моделирования: энергию отсечки волновой функции – 40 Ry (1 Ry  $\approx$  13,605 эВ), энергию отсечки плотности заряда и потенциалов – 160 Ry [7]. Зона Бриллюэна представлена с помощью сетки Монкхорста-Пака размерами  $12 \times 12 \times 1$ . Для устранения возможных паразитных осцилляций энергии при выполнении моделирования к рассматриваемой структуре сверху и снизу добавлялись слои вакуума толщиной 20 бор каждый (1 бор  $\approx$   $5,29 \cdot 10^{-11}$  м).

На рис. 1 показаны особенности расположения атомов углерода С и водорода Н в структуре для 100 % гидрированного графена – графана вида  $C_2H_2$ . На рис. 1, *a* изображен вид на структуру сверху, т. е. атомы углерода и водорода расположены в плоскости координат  $xy$ , на рис. 1, *b* – вид сбоку в плоскости координат  $zx$ .



**Рис. 1.** Особенности расположения атомов углерода С и водорода Н в структуре графан типа  $C_2H_2$ :  
*a* – вид сверху в плоскости координат  $xy$ ; *b* – вид сбоку в плоскости координат  $zx$

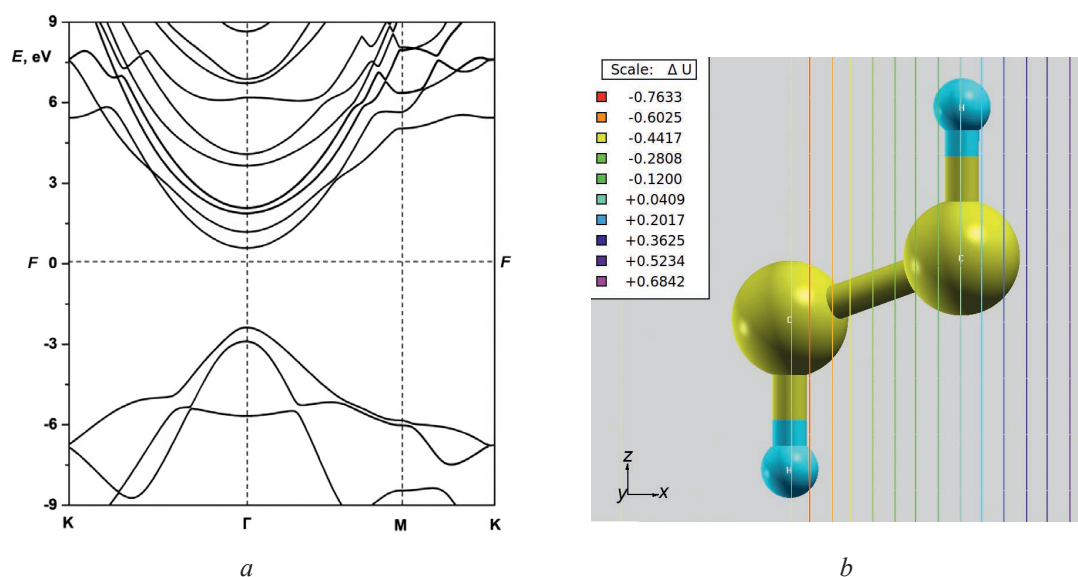
**Fig. 1.** Features of the arrangement of carbon C and hydrogen H atoms in the  $C_2H_2$ -type graphane structure:  
*a* – top view in the  $xy$  coordinate plane; *b* – side view in the  $zx$  coordinate plane

Из рисунков видно, что графан вида  $C_2H_2$  относится к структурной группе, которую в [3, 5] называют изомером типа chair («кресло»). Согласно [3], эта структурная группа отличается наибольшей стабильностью в сравнении с другими известными структурными группами или изомерами – stirrup, boat, twist-boat, twist-boat-chair, armchair, tricycle и т. д.

При проведении моделирования на начальных этапах были выполнены итерационные процедуры, цель которых – определение параметров элементарной ячейки, использованной для описания исследуемой структуры. В процессе моделирования уточнены координаты атомов углерода и водорода, значения постоянной кристалла и ряд других параметров с использованием подпрограмм *vc-relax* и *vc*, входящих в программу *pw* программного комплекса Quantum Espresso [6]. Этап работ, связанный с самосогласованным и несамосогласованным энергетическим моделированием с помощью подпрограмм *scf* и *nscf*, входящих в программу *pw*, а затем с использованием программ *bands* и *plotband*, позволил построить зонные диаграммы. В результате были получены данные, связанные с построением зонных диаграмм и рядом других характеристик графена и графана, которые могут быть использованы в составе различных гетероструктурных приборов. Как известно, функционирование такого рода приборов осуществляется при подаче постоянного напряжения питания на их контакты и при формировании таким образом распределения электрического поля внутри структуры.

### Результаты моделирования из первых принципов параметров и характеристик гидрированного графена

Результаты моделирования для исследованной структуры графана представлены на рис. 2, а, 3, 4. Полученные данные находятся в хорошем соответствии с результатами, приведенными в [2–5]. На рис. 2, а показана полученная путем моделирования с применением функционала РВЕ зонная диаграмма 100 % гидрированного графена (графана типа  $C_2H_2$ ) без использования внешнего электрического поля. Распределение уровня Ферми на рис. 2, 3 показано буквами FF. Как видно из рис. 2, а, графан типа  $C_2H_2$  характеризуется минимальным энергетическим зазором для долины Г между валентной зоной и зоной проводимости, величина которого  $\sim 3,03$  эВ. Моделирование для этой структуры без внешнего электрического поля, но при использовании другого программного комплекса – CASTEP, позволило получить величину минимального энергетического зазора для долины Г между валентной зоной и зоной проводимости, равную 3,5 эВ [5].

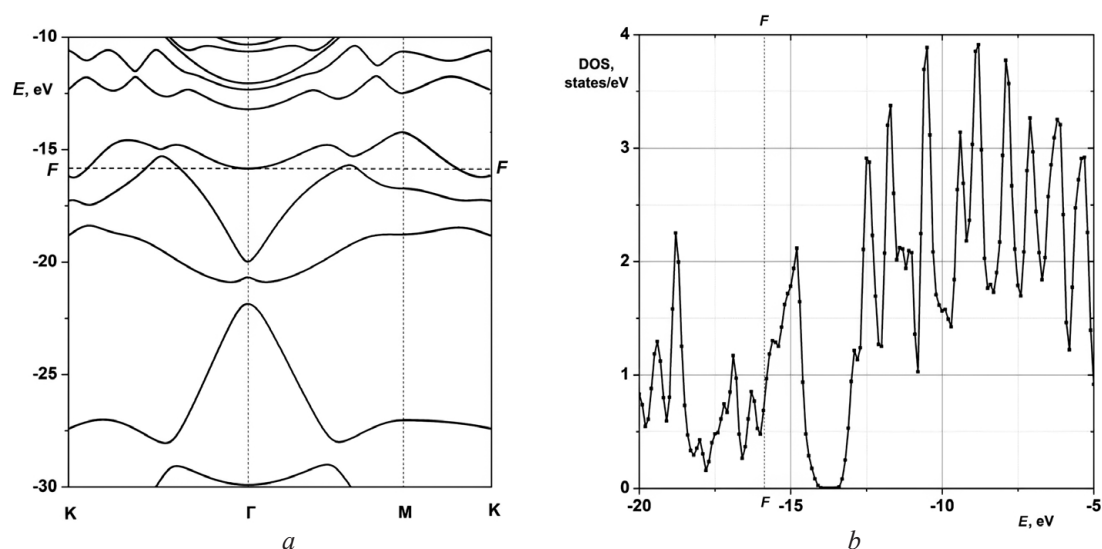


**Рис. 2.** Особенности: *a* – построения зонной диаграммы для графана типа  $C_2H_2$  без внешнего электрического поля; *b* – распределение внешнего электрического поля вдоль продольной оси *x*, построенное на фоне элементарной ячейки для графана

**Fig. 2.** Peculiarities: *a* – of the zone diagram for  $C_2H_2$  graphene without external electric field; *b* – distribution of the external electric field along the longitudinal axis *x*, plotted against the background of the unit cell for graphene

На рис. 2, *b* показаны особенности распределения внешнего электрического поля вдоль продольной оси  $x$  для элементарной ячейки графана, которая состоит из двух атомов углерода С и двух атомов водорода Н. Внешнее электрическое поле, имеющее пилообразную форму, сформировано при включенном параметре *tefield* в программном комплексе Quantum Espresso. Параметры, которыми определяется форма этого электрического поля, а именно – направление, максимальная величина напряженности, координата максимальной напряженности, зона, вдоль которой электрическое поле убывает, – задаются выбором специальных параметров моделирования – *dir*,  $E_{amp}$ , *etaxpos*, *eorreg*. Для всех результатов моделирования значение *etaxpos* выбиралось равным 0,9, а *eorreg* – 0,1, что позволило сформировать распределение электрического поля, близкое к распределениям, которое складывается в реальных полупроводниковых приборах при подаче на них внешнего напряжения питания (рис. 2, *b*). Значения параметров *dir* и  $E_{amp}$  изменялись, что позволяло изменить направление приложенного электрического поля и его максимальную величину напряженности.

На рис. 3 показаны полученные путем моделирования зонная диаграмма и зависимость плотности состояния (параметр DOS) от величины энергии  $E$  для гидрированного графана (графана). При этом значение амплитуды напряженности внешнего электрического поля  $E_{amp}$  принималось 1,0 а.у., а *dir* – 1,0 (при выборе направления внешнего поля вдоль условной оси  $x$ ). Анализ этого рисунка и других результатов моделирования показывает, что при значительном увеличении максимальной напряженности внешнего электрического поля, значения которой превышают 0,8 а.у., зонные диаграммы графана приобретают вид, который свойственен металлическим структурам.



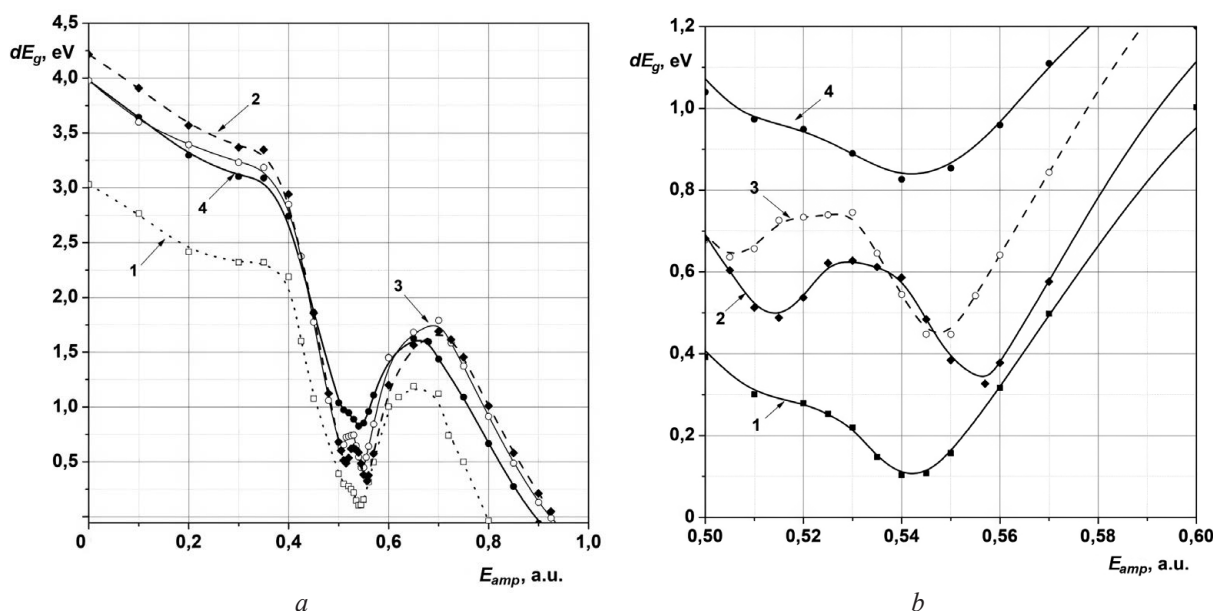
**Рис. 3.** Зонная диаграмма (*a*) и зависимость плотности состояния (DOS) (*b*) от энергии  $E$  для гидрированного графана (графана) при  $E_{amp} = 1,0$  а.у.

**Fig. 3.** Zone diagram (*a*) and the dependence of the state density (DOS) (*b*) on the energy value  $E$  for hydrogenated graphene (graphane) at the  $E_{amp} = 1.0$  а.у.

На рис. 4 построены полученные путем моделирования зависимости минимального междолинного зазора  $dE_g$  между зоной проводимости и валентной зоной для гидрированного графана (графана) вида  $C_2H_2$  от напряженности внешнего электрического поля  $E_{amp}$ . Рис. 4, *b* позволяет более детально исследовать особенности поведения параметра  $dE_g$  в диапазоне изменения значений  $E_{amp}$  от 0,5 до 0,6 а.у. При этом кривая 1 на рис. 4, *b* построена при использовании функционала PBE, кривая 2 – GAUPBE, кривые 3, 4 – функционала HSE. Кривые 1–3 получены при выборе параметра *dir* = 1, т. е. при направлении внешнего поля вдоль условной оси  $x$ , кривая 4 – при выборе *dir* = 2 (направление внешнего поля вдоль условной оси  $y$ ).

Анализ рис. 4 показывает, что характер зависимости минимального междолинного зазора  $dE_g$  между зоной проводимости и валентной зоной для гидрированного графана (графана) вида  $C_2H_2$  от напряженности внешнего электрического поля  $E_{amp}$  носит сложный, немонотонный характер. При малых величинах  $E_{amp}$  (до значений  $\sim 0,3$  а.у.) наблюдаются зонные диаграммы графана с прямым минимальным зазором для долины Г между зоной проводимости и валентной зоной, которые похожи на зонную диаграмму, представленную на рис. 2, *a*.





**Рис. 4.** Зависимость минимального междолинного зазора  $dE_g$  между зоной проводимости и валентной зоной для гидрированного графена (графана) вида  $C_2H_2$  от  $E_{amp}$ :  
 $a$  – общая;  $b$  – в диапазоне изменения  $E_{amp}$  от 0,5 до 0,6 а.е.

**Fig. 4.** Dependence of the value of the minimum gap  $dE_g$  between the conduction zone and the valence zone for hydrogenated graphene (graphene) of  $C_2H_2$  on the  $E_{amp}$ :  $a$  – general;  $b$  – in the range of the  $E_{amp}$  from 0.5 to 0.6 a.u.

При дальнейшем увеличении внешнего электрического напряжения наблюдаются зонные диаграммы с непрямым минимальным междолинным зазором. При еще больших значениях напряженности внешнего электрического поля ( $>0,8$  а.е.) зонные диаграммы графана приобретают вид, который свойственен металлическим структурам, что видно из рис. 3. Анализ представленных выше данных показывает, что при моделировании гетероструктурных приборов, которые используют графан, необходимо учитывать влияние внешнего электрического поля, которое формируется при подаче на контакты структуры напряжения питания и других сигналов.

### Заключение

Приведены результаты исследования свойств и характеристик гидрированного графена – графана типа  $C_2H_2$ . Установлено, что приложенное к структуре графана внешнее электрическое поле приводит к существенному изменению его зонных диаграмм, которое связано с изменением их типа. При малых значениях напряженности внешнего электрического поля (до  $\sim 0,3$  а.е.) наблюдаются зонные диаграммы графана с прямым минимальным зазором для долины  $\Gamma$  между зоной проводимости и валентной зоной. При дальнейшем увеличении внешнего электрического поля наблюдаются зонные диаграммы с непрямым минимальным междолинным зазором. При больших значениях напряженности внешнего электрического поля, превышающих  $0,8$  а.е., зонные диаграммы графана приобретают вид, который свойственен металлическим структурам. Полученные зависимости и параметры графана могут служить основой для создания новых полевых транзисторов и гетероструктурных приборов, содержащих слои графена и других полупроводниковых материалов.

### References

1. Novoselov K. S., Geim A. K. et al. (2004) Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*. 306 (5696), 666–669. DOI: 10.1126/science.1102896.
2. Elias D. C., Nair R. R., Mohiuddin T. M. G., Morozov S. V., Blake P., Halsall M. P., Ferrari A. C., Boukhvalov D. W., Katsnelson M. I., Geim A. K., Novoselov K. S. (2009) Control of Graphene's Properties by Reversible Hydrogenation: Evidence for Graphane. *Science*. 323 (5914), 610–616. DOI: 10.1126/science.1167130.
3. Sahin H., Leenaerts O., Singh S. K., Peeters F. M. (2015) GraphAne: from Synthesis to Applications. *arXiv*. 1–15.

4. Bruzzone S., Fiori G. (2011) Ab-Initio Simulations of Deformation Potentials and Electron Mobility in Chemically Modified Graphene and Two-Dimensional Hexagonal Boron-Nitride. *Applied Physics Letters*. 99, 222108. <https://doi.org/10.1063/1.3665183>.
5. Sofo J. O., Chaudhari A. S., Barber G. D. (2007) Graphane: a Two Dimensional Hydrocarbon. *Physical Review B*. 75, 153401.
6. Giannozzi P., Baroni S., Bonini N. et al. (2009) Quantum Espresso: a Modular and Open-Source Software Project for Quantum Simulations of Materials. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 21 (39), 395502. DOI: 10.1088/0953-8984/21/39/395502.
7. Murav'ev V. V., Mishchenka V. M. (2021) Ab-Initio Simulation of Hydrogenated Graphene Properties. *Doklady BGUIR*. 19 (8), 5–9. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-8-5-9> (in Russian).

### Вклад авторов

Муравьев В. В. предложил идею проведения исследования влияния внешнего электрического поля на свойства гидрированного графена.

Мищенко В. Н. выполнил моделирование при воздействии внешнего электрического поля на структуру гидрированного графена.

### Authors' contribution

Muravyev V. V. proposed the idea of conducting research on the effect of an external electric field on the properties of hydrogenated graphene.

Mishchenka V. N. performed simulations under the influence of an external electric field on the structure of hydrogenated graphene.

### Сведения об авторах

**Муравьев В. В.**, чл.-кор. Национальной академии наук Беларуси, д. т. н., профессор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Мищенко В. Н.**, к. т. н., доцент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-80-70  
E-mail: [mishchenko@bsuir.by](mailto:mishchenko@bsuir.by)  
Мищенко Валерий Николаевич

### Information about the authors

**Muravyov V. V.**, Corr. Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. of Sci. (Eng.), Professor of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Mishchenka V. N.**, Cand. of Sci., Associate Professor of the 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 17 293-80-70  
E-mail: [mishchenko@bsuir.by](mailto:mishchenko@bsuir.by)  
Mishchenka Valery Nikolaevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-27-31>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.385.6

## ДИСПЕРСИЯ ВОЛН ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ. ВОЛНОВАЯ И КОРПУСКУЛЯРНАЯ ФОРМЫ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЧАСТИЦЫ

А. А. КУРАЕВ, В. В. МАТВЕЕНКО

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

Поступила в редакцию 16.09.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Исследована дисперсия волн пространства-времени, описывающих поведение квантовых частиц в средах, имеющих частоты собственных колебаний  $f_0$ . Определены фазовая и групповая скорости частиц. Описаны трансформация формы частицы из волновой в корпускулярную и обусловленный этой трансформацией эффект наблюдателя. Объяснена мгновенная передача фазовых состояний частиц в наблюдаемых явлениях телепортации и запутанности состояний квантовых частиц. Пояснены причины в различии наблюдаемых скоростей гравитационных волн.

**Ключевые слова:** волны пространства-времени, гравитационные волны, собственные частоты сред, дисперсия, фазовые скорости, эффект наблюдателя, телепортация, запутанные квантовые состояния.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Кураев, А. А. Дисперсия волн пространства-времени. Волновая и корпускулярная формы элементарной частицы / А. А. Кураев, В. В. Матвеев // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 2. С. 27–31. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-27-31>.

## SPACE-TIME DISPERSION OF WAVES. WAVE AND CORPUSCULAR FORMS OF ELEMENTARY PARTICLES

ALEXANDER A. KURAYEV, VLADIMIR V. MATVEYENKA

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

Submitted 16.09.2022

**Abstract.** The article studies space-time dispersion of waves describing the behavior of quantum particles in media with eigenfrequencies  $f_0$ . The phase and group velocities of the particles are determined. The transformation of the shape of a particle from wave to corpuscular and the effect of the observer caused by this transformation are described. The instantaneous transfer of phase states of particles in the observed teleportation and involution phenomena of quantum particles states is explained. The discrepancy, observed in gravitational waves, velocities is explained.

**Keywords:** space-time waves, gravitational waves, media eigenfrequencies, dispersion, phase velocities, observer effect, teleportation, quantum states involution.

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

**For citation.** Kurayev A. A., Matveyenka V. V. (2023) Space-Time Dispersion of Waves. Wave and Corpuscular Forms of Elementary Particles. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 27–31. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-27-31> (in Russian).

## Введение

В [1] сформулирована волновая гипотеза пространства-времени. В ней разделяются физическое  $\vec{r}, \vec{t}$  и расчетное пространство-время  $\vec{R}, T$ , причем  $\vec{t}$  имеет векторную, а не скалярную форму. В системе  $\vec{R}, T$  сформулированы максвеллоподобные уравнения для физических компонент  $\vec{r}, \vec{t}$ , определены энергии пространства и времени, сформулирован закон сохранения для них, определены источники пространства-времени. Получены волновые уравнения для  $\vec{r}, \vec{t}$ . Волновой процесс, как и в электромагнитном поле волны, обусловлен превращением энергии  $\vec{r}$  в энергию  $\vec{t}$  и наоборот в течение цикла колебаний.

В [2] установлены основные законы излучения, рефракции и дифракции волновой компоненты пространства-времени, объяснены опыты по наблюдению обратного хода времени. В [3] отмечено, что волны де Бройля идентичны волнам пространства-времени, из чего следует, что элементарные частицы являются структурированными пакетами волн пространства-времени. В [4] рассмотрены особенности распространения волн пространства-времени в нелинейной среде, показатель преломления которой зависит от энергии  $\epsilon$  пакета волн (частицы):  $n(\epsilon) = n_0 + n_1(\epsilon)$ ,  $\epsilon = mc^2$  (где  $m$  – масса частицы;  $c$  – скорость света в вакууме). Показано, что траектория пробной частицы-волны искривляется с положительным радиусом кривизны относительно частицы-источника, что и определяет притяжение частиц – гравитацию. В [5] на основе гипотезы о волнах пространства-времени дано объяснение инверсии причинно-следственных связей, которая наблюдалась в опытах по генерации и приему сверхкоротких лазерных импульсов.

Таким образом, гипотеза о волнах пространства-времени и о представлении материальной частицы в форме волнового пакета оказалась полезной для объяснения механизма некоторых фундаментальных явлений. Но гипотеза превращается в теорию после открытия (регистрации) гравитационных волн 14 сентября 2015 года с помощью лазерного интерферометра LIGO [6]. Дело в том, что в соответствии с общей теорией относительности гравитационная волна – это волна кривизны пространства, т. е. пространственная компонента волны пространства-времени. Как указано выше, пространственная волна не может существовать без волны времени – энергия одной компоненты переходит в другую дважды за период колебания подобно тому, как это имеет место в электромагнитной волне – энергия магнитного поля и энергия электрического поля обмениваются в волне и в стоячем поле (пакете волн). При открытии гравитационных волн также обнаружен интересный факт: регистрируемая скорость волн по разным направлениям колеблется от 0,55 до 1,42 скорости света в вакууме. Такое возможно в отношении фазовой скорости волны, проходящей в дисперсной среде [7, 8]. Поэтому исследованию дисперсии волн пространства-времени и вытекающих из этого явления следствий, особенно в отношении элементарных частиц, посвящена настоящая статья.

## Дисперсия волн пространства-времени в неограниченной области

Как отмечалось выше, в теории волн пространства-времени [1–5] разделяются физическое  $\vec{r}, \vec{t}$  и расчетное  $\vec{R}, T$  пространство-время ( $\vec{t}$  – вектор,  $T$  – скаляр). Уравнения, определяющие  $\vec{r}, \vec{t}$  в расчетной системе  $\vec{R}, T$ , изоморфны уравнениям Максвелла для компонент электромагнитного поля  $\vec{H}, \vec{E}$ :

$$\text{rot } \vec{r} = \frac{\partial(\vec{k}_1 \vec{t})}{\partial T} - \vec{r}_0; \quad \text{rot } \vec{t} = -\frac{\partial(\vec{k}_2 \vec{r})}{\partial T} + \vec{v}_0, \quad (1)$$

где  $\vec{k}_1, \vec{k}_2$  – тензорные характеристики среды рассматриваемой области в отношении волн пространства-времени.

Показатели  $\vec{k}_1, \vec{k}_2$  аналогичны  $\vec{\epsilon}$  и  $\vec{\mu}$  в уравнениях Максвелла. Также в смысле изоморфизма  $\vec{r}, \vec{t}$  аналогичны  $\vec{H}, \vec{E}, \vec{r}_0, \vec{v}_0$ , имеют смысл источников вихрей  $\vec{r}, \vec{t}$ . Изменение энергии временной  $\epsilon_t$  и пространственной  $\epsilon_r$  компонент определяется, как в [1]:

$$\frac{\partial \epsilon_t}{\partial T} = \vec{t} \frac{\partial(\vec{k}_1 \vec{t})}{\partial T}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \epsilon_r}{\partial T} = \vec{r} \frac{\partial(\vec{k}_2 \vec{r})}{\partial T}. \quad (3)$$

Согласно (2), (3), закон сохранения энергии можно записать в виде

$$\vec{t} \frac{\partial(\vec{k}_1 \vec{t})}{\partial T} + \vec{r} \frac{\partial(\vec{k}_2 \vec{r})}{\partial T} = 0. \quad (4)$$

В общем случае  $\vec{k}_1 = \vec{k}_1(\vec{R}, T, f)$ ,  $\vec{k}_2 = \vec{k}_2(\vec{R}, T, f)$ , где  $f$  – частота волнового процесса. Для изучения дисперсии волн можно упростить задачу. Допустим,  $\vec{k}_1 = k_1(f)$ ,  $\vec{k}_2 = k_2(f)$ , т. е. можно считать среду распространения волн пространства-времени изотропной, однородной и постоянной во времени. Тогда с учетом системы (1) запишутся следующие волновые уравнения для  $\vec{t}$ ,  $\vec{r}$  в свободной от источников области ( $\vec{r}_0 = 0$ ,  $\vec{v}_0 = 0$ ):

$$\nabla^2 \vec{r} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial T^2} = 0; \quad \nabla^2 \vec{t} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{t}}{\partial T^2} = 0; \quad v^2 = \frac{1}{k_1 k_2}. \quad (5)$$

Уравнения (5) являются стандартной формой волнового уравнения для любого по физическому содержанию волнового процесса (в частности, электромагнитного),  $v^2 = 1/k_1 k_2$  имеет смысл фазовой скорости волны в свободном от источников изотропном однородном пространстве. В спектральной области, полагая  $\partial / \partial T = j\omega$ , из (5) получаем:

$$\nabla^2 \vec{r} + k^2 \vec{r} = 0; \quad \nabla^2 \vec{t} + k^2 \vec{t} = 0, \quad (6)$$

где  $k^2 = \frac{\omega^2}{v^2} = \omega^2 k_1 k_2$ .

Решение (6) имеет форму плоской волны вида

$$\vec{\Psi}(T, R) = \vec{A}(R) e^{j(\omega T - \vec{k} R)}. \quad (7)$$

В соответствии с [3],  $\vec{k} = \vec{P} / \hbar$ , где  $\vec{P}$  – импульс элементарной частицы;  $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27}$  эрг·с – постоянная Планка. Уравнения (6) и вид их решений (7) для неограниченной области совпадают (если не расшифровывать смысл обозначений  $\vec{k}$ ) с аналогичными уравнениями и решениями для электромагнитных волн [7, 8]. Этой аналогией можно воспользоваться при исследовании волн пространства-времени.

Рассмотрим случай, когда в среде распространения волн существуют собственные колебания с частотой  $f_0$  ( $\omega_0 \approx 2\pi f_0$ ):

– при пространственной частоте  $f_0$  параметр  $k_1$  будет иметь вид

$$k_1 = k_{01} \left( 1 - \frac{f_0^2}{f^2} \right) = k_{01} \left( 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right);$$

– при временной частоте  $f_0$  параметр  $k_2$

$$k_2 = k_{20} \left( 1 - \frac{f_0^2}{f^2} \right) = k_{20} \left( 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right).$$

Либо в первом, либо во втором случае оказывается, что

$$k^2 = k_0^2 \left( 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right) = k_1 k_2. \quad (8)$$

Форма дисперсионной зависимости  $\vec{k}$  в рассматриваемом случае непосредственно следует из уже подробно изученных аналогичных ситуаций в электродинамике при решении (6) в случае распространения в ионизированном газе, где роль  $\omega_0$  играет собственная круговая частота ионизированного газа (частота Ленгмюра)  $\omega_0 = \sqrt{\frac{e^2 N e}{\epsilon_0 m}}$  (где  $e$ ,  $m$  – заряд и масса электрона;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $N e$  – электронная концентрация, эл/см<sup>3</sup>). Таким образом

$$k^2 = k_0^2 \left( 1 - \frac{f_0^2}{f^2} \right),$$

где  $k_0 = \omega/c$ ;  $c$  – скорость света в вакууме;  $k = \omega/v_{\Phi}(f)$ .

Следовательно, фазовая скорость волны

$$v_{\phi} = c \sqrt{1 - \frac{f_0^2}{f^2}}. \quad (9)$$

Необходимо отметить, что в дисперсионных средах описанного типа выполняется соотношение  $v_{\phi}v_{\Gamma} = c^2$ , где  $v_{\Gamma}$  – групповая скорость волны

$$v_{\Gamma} = c \sqrt{1 - \frac{f_0^2}{f^2}}. \quad (10)$$

Полученные для  $v_{\phi}$  и  $v_{\Gamma}$  формулы можно применить при анализе некоторых наблюдаемых явлений.

### Трансформация формы частицы из волновой в корпускулярную. Эффект наблюдателя

Пусть распространение волны-частицы описывается решением (7) при форме записи  $\vec{k} = \vec{e}_0 k$ , где  $\vec{e}_0$  – направление движения волны. Тогда в соответствии с (8) при  $f > f_0$  фазовая скорость волны  $v_{\phi}$  остается действительной, и волновой процесс сохраняется, т. е. частица перемещается в форме волнового импульса. Но при  $f < f_0$  скорость  $v_{\phi}$  – мнимая, и волновой процесс невозможен, а частица становится тем более локализованной, чем менее  $f$  по сравнению с  $f_0$ . Распределение частицы в пространстве  $\vec{R}$  определяется как

$$e^{\left( \begin{array}{c} \frac{\omega}{c} R \\ \sqrt{\frac{\omega_0^2}{\omega^2} - 1} \end{array} \right)}.$$

То есть частица становится локализованной и приобретает корпускулярную форму. Описанное явление гипотетически может объяснить «эффект наблюдателя»: ненаблюдаемая частица ведет себя как волна, но при воздействии наблюдателя проявляет себя как корпускула. Если в процессе наблюдения его воздействие на среду создает в ней собственные колебания с частотой  $f_0$ , большей, чем частота частицы-волны, то происходит описанный выше процесс трансформации частицы-волны в частицу-корпускулу.

Может быть предложена и другая гипотеза: в среде для каждой  $i$ -й частицы-волны пространства-времени существует собственная частота колебаний  $f_{0i}$ . Причем  $f_{0i} < f_i$ , где  $f_i$  – частота  $i$ -й частицы. Акт наблюдения отнимает определенную энергию частицы, такую, что  $f_i$  уменьшается настолько, что  $f_{0i}$  становится больше ее. Тем самым форма частицы трансформируется в корпускулярную, что и наблюдается.

### Телепортация. Запутанные квантовые состояния

Телепортация, запутанные квантовые состояния – весьма необычные явления в мире квантовых частиц, механизм которых не имеет однозначного описания [9]. В статье не делалась попытка представить подобные описания. Следует обратить внимание только на одну сторону этих явлений – фазовые характеристики (фазы, частоты, поляризации) частицы или двух частиц передаются мгновенно на неопределенно большие расстояния. С точки зрения изложенных выше представлений это возможно исходя из (9) для фазовой скорости квантовой частицы при условии  $f = f_0$  и сохранении  $f_0$  во всей наблюдаемой области:  $v_{\phi} / f_0 \rightarrow f \rightarrow \infty$ . В то же время при  $f > f_0$  фазовая скорость  $v_{\phi}$  (9) больше скорости света, а групповая скорость  $v_{\Gamma}$  (10) – меньше  $c$ . Это и наблюдается при регистрации гравитационных волн [6].

### Заключение

Исследования дисперсии волн пространства-времени, описывающих поведение квантовых частиц в средах, имеющих частоты собственных колебаний, позволяют частично объяснить некоторые весьма сложные явления, такие как эффект наблюдателя, телепортацию и запутанные состояния квантовых частиц, различие скоростей гравитационных волн.

### Список литературы

1. Кураев, А. А. Изоморфизм и волновая гипотеза пространства-времени / А. А. Кураев // Доклады БГУИР. 2003. № 4. С. 13–16.
2. Кураев, А. А. Излучение, рефракция и дифракция волновой компоненты пространства-времени / А. А. Кураев // Доклады БГУИР. 2007. № 4. С. 181–184.
3. Кураев, А. А. Темная материя и волны пространства-времени / А. А. Кураев // Доклады БГУИР. 2010. № 7. С. 31–33.
4. Кураев, А. А. Волны пространства-времени в нелинейной среде. Гравитация / А. А. Кураев // Доклады БГУИР. 2011. № 6. С. 92–93.
5. Кураев, А. А. Флуктуации времени и инверсия причинно-следственных связей / А. А. Кураев // Доклады БГУИР. 2010. № 2. С. 115–116.
6. Abbot, V. P. et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger // *Physical Review Letters*. 2016. Vol. 116, No 6. P. 5–16.
7. Кураев, А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Синицын. М.: Инфра-М, 2016. 424 с.
8. Никольский, В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. И. Никольский. М.: Физматлит, 1989. 288 с.
9. Баргатин, И. В. Запутанные квантовые состояния атомных систем / И. В. Баргатин, Б. А. Гришанин, В. Н. Задков // *Успехи физических наук*. 2001. Т. 171, № 6. С. 625–647.

### References

1. Kurayev A. A. (2003) Isomorphism and the Wave Hypothesis of Space-Time. *Doklady BSUIR*. (4), 13–16 (in Russian).
2. Kurayev A. A. (2007) Radiation, Refraction and Diffraction of the Wave Component of Space-Time. *Doklady BSUIR*. (4), 181–184 (in Russian).
3. Kurayev A. A. (2010) Dark Matter and Space-Time Waves. *Doklady BSUIR*. (7), 31–33 (in Russian).
4. Kurayev A. A. (2011) Waves of Space-Time in a Nonlinear Medium. *Gravity. Reports of BSUIR*. (6), 92–93 (in Russian).
5. Kurayev A. A. (2010) Time Fluctuations and Inversion of Cause-and-Effect Relationships. *Doklady BSUIR*. (2), 115–116 (in Russian).
6. Abbot V. P. et al. (2016) Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters*. 116 (6), 5–16.
7. Kurayev A. A., Popkova T. L., Sinitsyn A. K. (2016) *Electrodynamics and Propagation of Radio Waves*. Moscow, Infra-M Publ. 424 (in Russian).
8. Nikolsky V. V., Nikolsky T. I. (1989) *Electrodynamics and Propagation of Radio Waves*. Moscow, Fizmatlit Publ. 288 (in Russian).
9. Bargatin I. V., Grishanin B. A., Zadkov V. N. (2001) Zutate Quantum States of Atomic Systems. *Advances in the Physical Sciences*. 171 (6), 625–647 (in Russian).

### Вклад авторов / Authors' contribution

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

### Сведения об авторах

**Кураев А. А.**, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Матвеенко В. В.**, к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-89-56  
E-mail: kurayev@bsuir.by  
Кураев Александр Александрович

### Information about the authors

**Kurayev A. A.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Matveyenka V. V.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Computational Methods and Programming Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-89-56  
E-mail: kurayev@bsuir.by  
Kurayev Alexander Alexandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-32-40>

*Оригинальная статья*

*Original paper*

УДК 621.381.8.004

## ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ШУМА КВАНТОВАНИЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА

В. К. ЖЕЛЕЗНЯК, К. Я. РАХАНОВ, Е. Р. АДАМОВСКИЙ

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

*Поступила в редакцию 27.09.2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Приведена методика оценки информационных параметров шума квантования, формируемого аналого-цифровым преобразованием измерительного сигнала. Представлены описание алгоритма методики и состав оборудования для имитационно-натурного эксперимента с целью подтверждения корректности способа обработки и выделения информационных параметров сигнала и шума квантования, в котором вместо измерительной антенны используется соединительный кабель. Показаны результаты проведенных измерений в виде графиков зависимостей времени выделения шума квантования путем накопления от влияющих факторов и контролируемых параметров, демонстрирующие предельные значения выделения информационных параметров шума квантования аналого-цифрового преобразования измерительного сигнала. Получено подтверждение гипотезы оценки информационных параметров шума квантования.

**Ключевые слова:** аналого-цифровое преобразование, измерительный сигнал, шум квантования, канал утечки информации.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Железняк, В. К. Оценка информационных показателей шума квантования аналого-цифрового преобразования речевого сигнала / В. К. Железняк, К. Я. Раханов, Е. Р. Адамовский // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 2. С. 32–40. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-32-40>.

## EVALUATION OF INFORMATION INDICATORS OF QUANTIZATION NOISE GENERATED BY SPEECH SIGNAL ANALOGUE-DIGITAL CONVERSION

VLADIMIR K. ZHELEZNYAK, KONSTANTIN JA. RAHANOV, YAHOR R. ADAMOVSKIY

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

*Submitted 27.09.2022*

**Abstract.** The paper presents a technique for estimating the information parameters of the quantization noise generated by the analog-to-digital conversion of the measuring signal. An experiment and algorithm descriptions are presented to confirm the correctness of the method for processing and extracting the information parameters of the signal and quantization noise, in which a connecting cable is used instead of a measuring antenna. The measurement results are shown in the form of graphs of the dependences of the quantization noise extraction time by accumulation on influencing factors and controlled parameters, which demonstrate the limiting values of the extraction of information parameters of the quantization noise of the analog-to-digital conversion of the measuring signal. Confirmation of the hypothesis of estimating the information parameters of the quantization noise is obtained.

**Keywords:** analog-to-digital conversion, test signal, quantization noise, information leakage channel.

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



**For citation.** Zheleznyak V. K., Rahanov K. Ja., Adamovskiy Y. R. Evaluation of Information Indicators of Quantization Noise Generated by Speech Signal Analogue-Digital Conversion. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 32–40. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-32-40> (in Russian).

## Введение

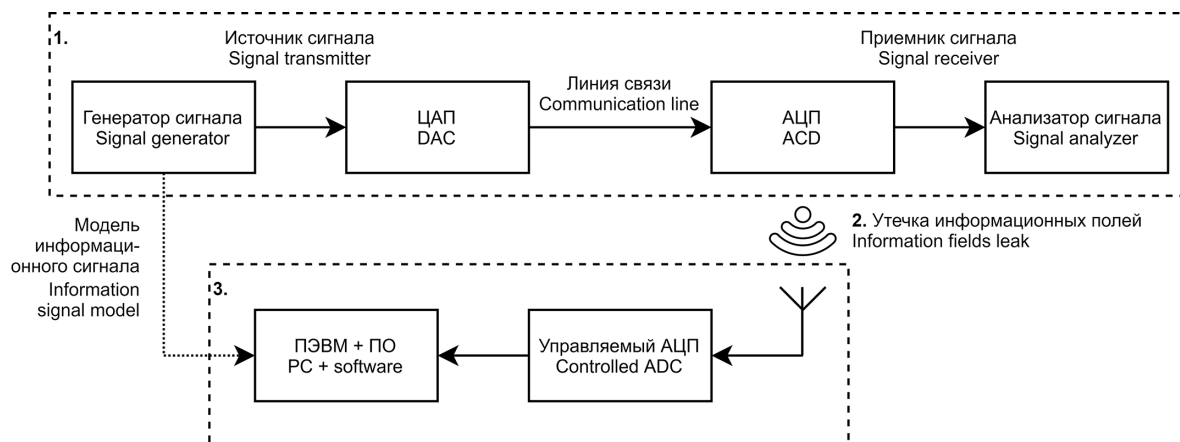
Передача цифровых речевых сигналов по линиям связи является неотъемлемой частью системы комплексной защиты информации [1] и относится к технической защите речевой информации средств коммуникации [2]. Одна из составных частей средств коммуникации – преобразование цифрового речевого сигнала в аналоговую форму с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) с последующей его передачей через линию связи до приемника сигнала.

Полученный аналоговый сигнал передается в анализатор или на излучающее устройство в понятной для человека форме. На этапе аналого-цифрового преобразования (АЦП) сигнала осуществляются дискретизация и квантование сигнала с помощью электронных компонентов, излучающих физические поля – магнитные и электрические, которые могут нести в себе информационные параметры о передаваемом сигнале, что является каналом утечки информации (КУИ). В [3, 4] оценку защищенности такого КУИ предлагается выполнять с помощью периодической последовательности импульсов треугольной формы, которая не вносит методических погрешностей, обусловленных нелинейностью шума квантования.

Наиболее эффективные методы оптимального приема детерминированного сигнала – на основе корреляционного приема. В случае сигнала известной формы более мощным средством обнаружения является функция взаимной корреляции [5]. В связи с этим цель исследований – количественная оценка информационных показателей шума квантования АЦП аналогового речевого сигнала.

## Методика оценки информационных показателей

Пример блок-схемы автоматизированной оценки канала утечки информационных полей аналого-цифрового преобразования приведен на рис. 1. Количественная оценка информационных показателей шума квантования должна выполняться с помощью автоматизированной системы, так как излучаемые физические поля характеризуются низким уровнем сигнала в шумах высокого уровня, и поэтому для их выделения потребуются дополнительная обработка и накопление. Блок-схема состоит из трех основных частей: системы приема-передачи, КУИ (излучаемые физические поля) и программно-аппаратного комплекса (ПАК) оценки КУИ.

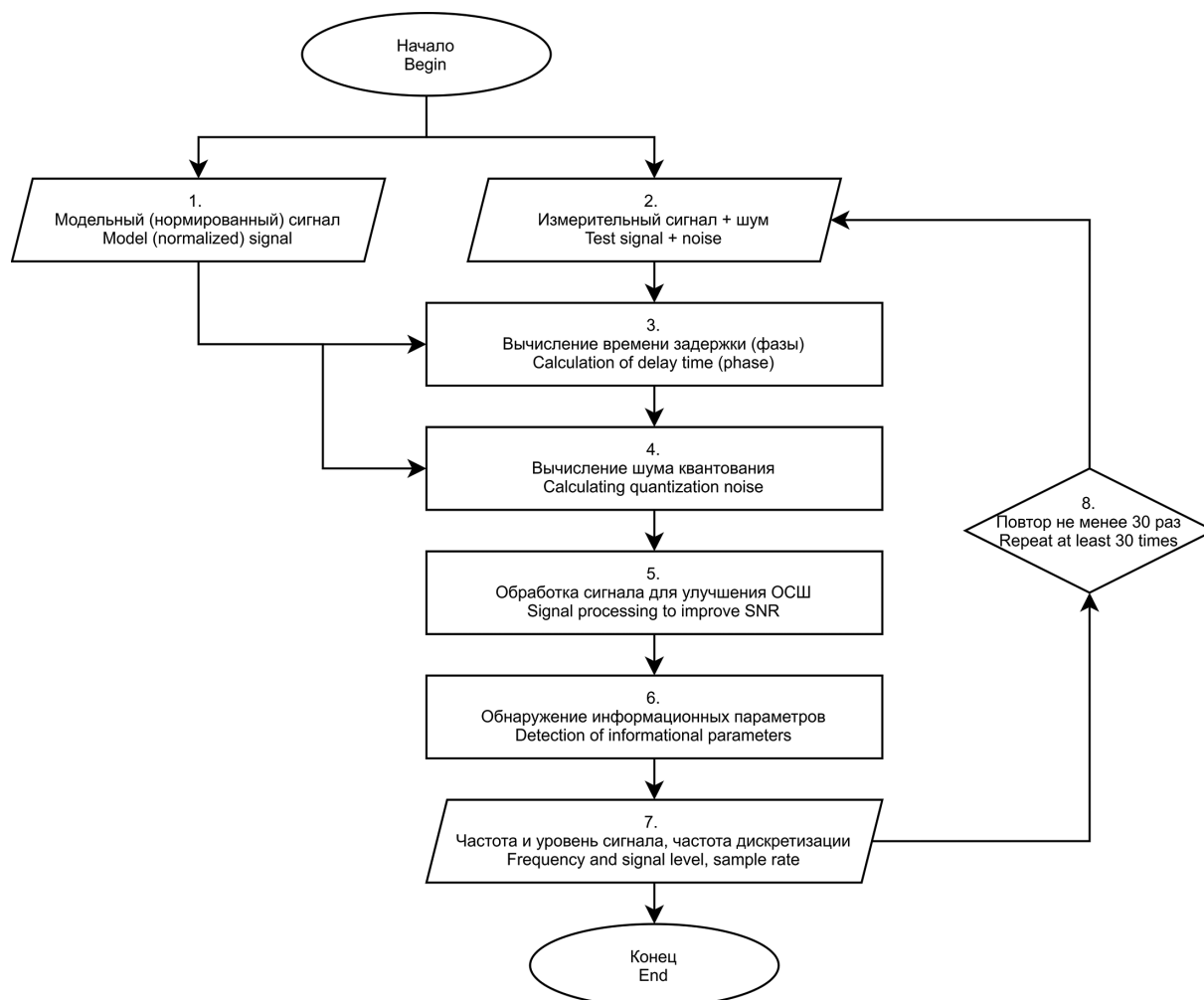


**Рис. 1.** Блок-схема автоматизированной оценки канала утечки информационных полей аналого-цифрового преобразователя

**Fig. 1.** Block diagram for automated evaluation of analog-to-digital conversion information fields in a leak channel

Система приема-передачи сигнала включает в себя генератор измерительного сигнала и ЦАП, передающий измерительный сигнал в линию связи, по которой сигнал поступает на АЦП в приемнике сигнала. В момент преобразования сигнала из аналоговой формы АЦП излучает физические поля, характеризующие КУИ. ПАК включает в себя измерительную антенну и персональную электронно-вычислительную машину (ПЭВМ) с установленным специальным программным обеспечением (ПО).

Излучаемые физические поля, возникающие при преобразовании сигнала в цифровую форму, фиксирует измерительная антенна, а затем передает их на управляемый АЦП для выделения и обработки информационных параметров сигнала и шума квантования, которые осуществляются с помощью специального ПО на ПЭВМ. В качестве обработки используется синхронное накопление, позволяющее улучшить отношение сигнал/шум (ОСШ). Алгоритм работы программного обеспечения представлен на рис. 2.



**Рис. 2.** Алгоритм оценки информационных параметров шума квантования аналого-цифрового преобразователя измерительного сигнала  
**Fig. 2.** Algorithm for estimating the information parameters of quantization noise obtained from the measurement signal in an analog-to-digital converter

Алгоритм включает следующие этапы.

1. Формируется модельный (идеальный) измерительный сигнал в цифровом виде, параметры которого согласованы с генератором сигнала (штриховая линия связи на рис. 1).
2. Захватывается сигнал с помощью измерительной антенны в точке наблюдения. При передаче сигнала по каналу связи значения фазы и амплитуды сигнала неизвестны, а сам сигнал подвергается искажениям и влиянию шумов. Блоки 1 и 2 на рис. 2 выполняются параллельно.
3. Определяется время задержки измерительного сигнала путем расчета взаимной корреляции смеси сигнала и шума с модельным сигналом.
4. Рассчитывается шум квантования путем вычисления разницы принятой смеси сигнала и шума и восстановленной цифровой копии сигнала с учетом фазы.
5. Применяются спектральное накопление и полосовая фильтрация сигналов.
6. Выполняется обнаружение информационных параметров канала утечки.
7. Рассчитанные показатели протоколируются и выводятся на экран.
8. Процедура обнаружения информационных параметров повторяется 30 раз, а результаты усредняются. После этого мощность шума увеличивается, измерения повторяются.

Этапы 5 и 6 можно представить в виде спектрального обнаружителя информационных параметров, блок-схема которого изображена на рис. 3. В обнаружителе для более эффективно накопления выполняется преобразование сигнала в частотную область с помощью операции быстрого преобразования Фурье (БПФ) и его разделение на действительную и мнимую части с независимым накоплением и последующим вычислением общего модуля спектральной составляющей. Требуемое количество накоплений до обнаружения сигнала и обнаруженная частота сигнала учитываются в определении исходного уровня информационного параметра.

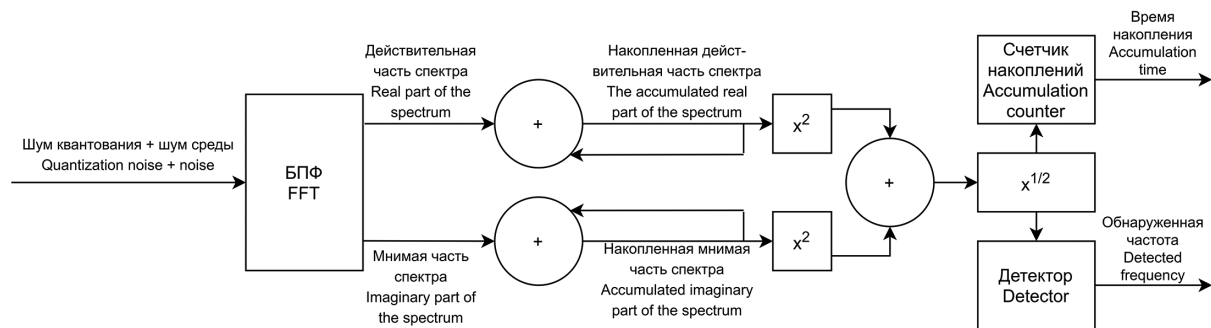


Рис. 3. Блок-схема спектрального обнаружителя информационных параметров  
Fig. 3. Block diagram for spectral information parameter detector

В полученном сигнале выполняется поиск максимального элемента, который в спектре шума квантования без аддитивной помехи соответствовал бы его главной гармонике на частоте дискретизации сигнала. Если обнаруженный максимум соответствует частоте дискретизации АЦП, делается вывод о том, что шум квантования накопился и может быть обнаружен над шумами. Постоянная составляющая в виде гармоники на нулевой частоте не учитывается при определении максимума. Записывается количество накоплений, которое потребовалось для выделения гармоники шума квантования при текущем уровне шума среды.

### Результаты исследований и их обсуждение

Для подтверждения работоспособности предложенного способа обработки и выделения информационных параметров сигнала и шума квантования проведен имитационный натурный эксперимент, в котором вместо измерительной антенны использовался соединительный кабель, подключенный от выхода ЦАП источника сигнала к аналоговому входу управляемого измерительного АЦП (рис. 4).

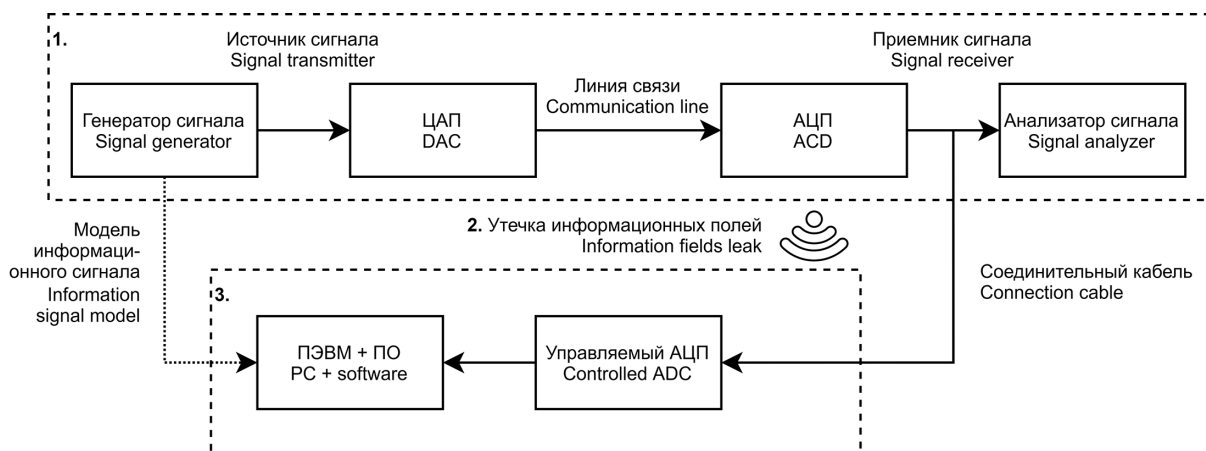
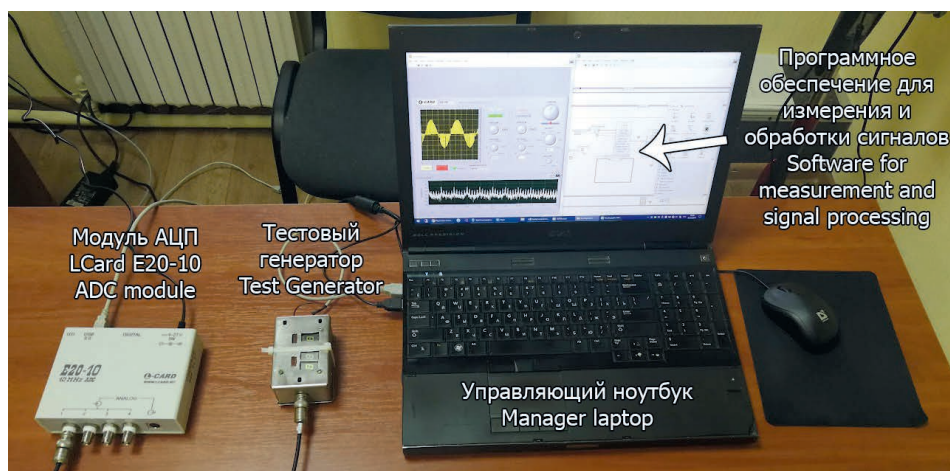


Рис. 4. Блок-схема имитационно-натурного эксперимента  
Fig. 4. Block diagram for a simulation-natural experiment

Блок-схема программно-аппаратного комплекса для обработки и выделения информационных параметров сигнала и шума квантования реализована в виде макета для проведения эксперимента (рис. 5).



**Рис. 5.** Макет программно-аппаратного комплекса для обработки и выделения информационных параметров

**Fig. 5.** The hardware-software complex layout for processing and extracting information parameters

Макет на рис. 5 не предназначен для оценки информационных физических полей АЦП и реализован с целью подтверждения на практике возможности оценки информационных параметров сигнала и шума квантования. Макет включает в себя аппаратную часть и специальное ПО, которое реализует предложенную модель оценки информационных параметров в программной среде LabVIEW. Аппаратная часть включала следующие элементы:

- электронно-вычислительную машину типа ноутбука;
- управляемый модуль АЦП/ЦАП LCard E20-10;
- генератор измерительного сигнала, встроенный ЦАП в ПЭВМ;
- кабель соединительный АЦП-ЭВМ: аналоговый разъем мини-джек (0,5 м);
- кабель управления АЦП/ЦАП USB 2.0 тип А–В, длина 1,5 м;
- внешний источник питания – сетевой адаптер ~220 В.

Эксперимент выполнялся в лаборатории при температуре окружающего воздуха 20 °С. Измерения проводились при изменении количества уровней дискретизации сигнала от 8 ( $L = 3$  бита) до 1024 ( $L = 10$  бит). Изменение количества уровней дискретизации (разрядности АЦП  $L$ ) выполнялось программным способом.

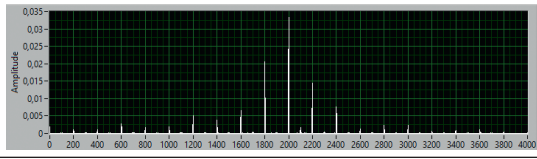
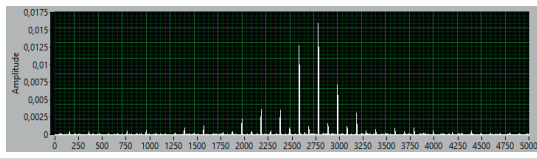
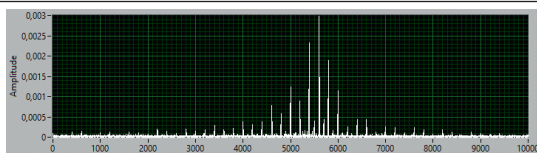
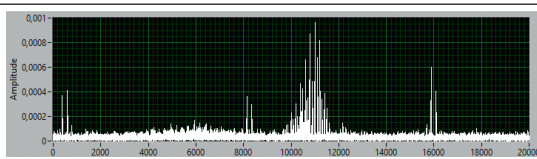
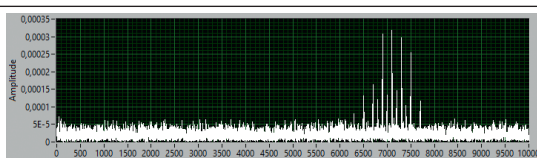
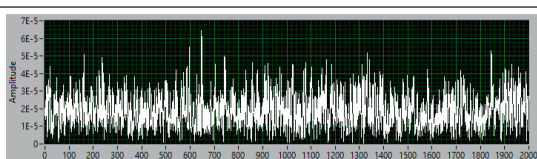
Предельные значения частоты и уровня сигнала устанавливали с помощью параметрической зависимости между влияющими факторами и контролируемыми параметрами как функция многих переменных при 30 повторениях измерения. Более подробное описание обнаружения предельных значений измерений предельных порогов обнаружения приводится в [6]. В табл. 1 представлены результаты обнаружения частоты и уровня шума квантования.

**Таблица 1.** Результаты обнаружения частоты и уровня шума квантования

**Table 1.** Frequency and level detection results for quantization noise

Разрядность $L$ / Bit length $L$	Ожидаемая частота, Гц/ Expected frequency, Hz	Обнаруженная частота, Гц/ Detected frequency, Hz	Уровень шума квантования/ Quantization noise level	Спектр накопленного шума квантования/ Cumulative quantization noise spectrum
3	1600	1600	0,6000	
4	3200	3200	0,1500	

Окончание табл. 1  
Ending of Table 1

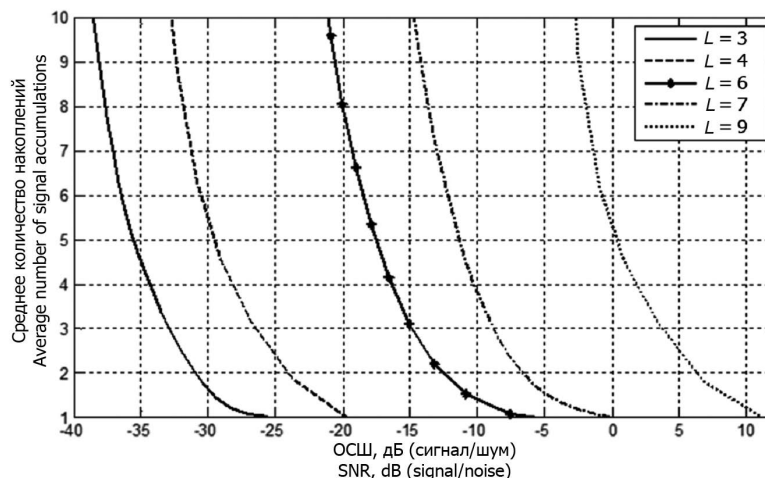
Разрядность $L$ / Bit length $L$	Ожидаемая частота, Гц/ Expected frequency, Hz	Обнаруженная частота, Гц/ Detected frequency, Hz	Уровень шума квантования/ Quantization noise level	Спектр накопленного шума квантования/ Cumulative quantization noise spectrum
5	6400	6400	0,0400	
6	12 800	12 800	0,0180	
7	25 600	25 600	0,0050	
8	51 200	51 200	0,0010	
9	102 400	—	0,0005	
10	204 800	—	0,0001	

Приведенные в табл. 1 данные демонстрируют, что обнаружение частоты и уровня шума квантования устойчиво выполняется до  $L = 8$  бит. При  $L = 9$  бит по спектру сигнала возможно судить о наличии шума квантования, но устойчивого выделения частоты и уровня сигнала не происходит. Для дискретизации при  $L = 10$  бит сигнал визуально не наблюдается.

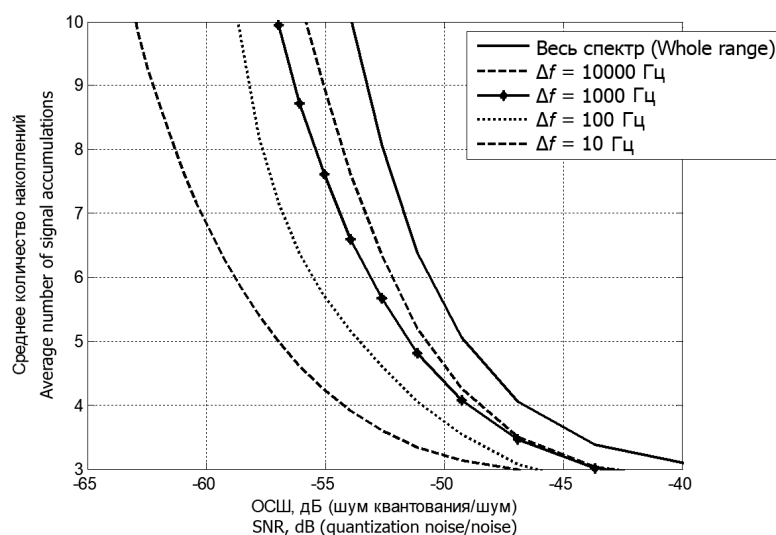
На рис. 6 представлены графики зависимостей среднего количества накоплений для выделения основной гармоники шума квантования из фонового шума от количества уровней дискретизации сигнала, сформированного устройством с разрядностью  $L$ . За приемлемое (по критерию времени) количество накоплений возможно оценить лишь некоторые диапазоны ОСШ, при которых гармоники шумов квантования выделяются в пределах 10 итераций.

Анализ рис. 6 показывает, что при увеличении  $L$ , которое снижает уровень гармоник шума квантования и повышает их частоту, резко возрастает требуемое для выделения количество накоплений сигнала при аналогичном уровне фонового шума. Добавление 1 разряда эквивалентно увеличению числа уровней квантования в два раза, это вызывает смещение графика на 7–8 дБ в сторону увеличения ОСШ. Например, при исходном ОСШ =  $-20$  дБ сигнал с  $L = 5$  в среднем может быть накоплен за восемь раз, а сигнал с  $L = 4$  – за один раз.

На рис. 7 представлены графики зависимостей времени накопления шума квантования от ширины полосы фильтра. Ограничение полосы фильтра осуществлялось фильтром с заданной полосой  $\Delta f$  вокруг ожидаемого отсчета смеси.



**Рис. 6.** Зависимость среднего количества накоплений для выделения основной гармонике шума квантования из фонового шума при различной разрядности аналого-цифрового преобразователя  $L$   
**Fig. 6.** Dependence of the accumulations average number for separating the quantization noise first harmonic from the background noise at different of analog-to-digital conversion bit length  $L$



**Рис. 7.** Зависимость времени накопления шума квантования от ширины полосы фильтра  
**Fig. 7.** Dependence of the quantization noise accumulation time on the filter bandwidth

Из рис. 7 следует, что сужение полосы в 10 раз позволяет уменьшить время накопления на 10–20 %. Это можно заключить из сравнения графиков, например, при ОСШ = –55 дБ. Следовательно, сужение полосы накопленной смеси позволяет уменьшить время выделения шума квантования, что может быть применено на практике перехватчиком сигнала для более быстрого поиска информационных составляющих в шумах при наличии у него сведений о технических характеристиках целевой системы. Это может позволить ему анализировать лишь ограниченную область частотного спектра.

### Заключение

1. Разработан макет локальной измерительной схемы, с помощью которого проведен имитационный натурный эксперимент оценки информационных показателей шума квантования аналого-цифрового преобразователя речевого сигнала. В качестве информационных показателей

канала утечки информации использовались частота дискретизации сигнала и амплитуда шума квантования.

2. С помощью макета локальной измерительной схемы выполнен натурный эксперимент, включающий определение параметров информационных составляющих шума квантования в канале утечки информации путем накопления и анализа сигнала. В результате проведения натурального эксперимента подтверждены гипотезы оценки информационных параметров шума квантования, получены численные значения информационных параметров.

3. В результате эксперимента получены зависимости времени накопления от отношения сигнал/шум квантования (фоновый шум) и времени накопления от разрядности аналого-цифрового преобразователя (уровня шума квантования), которые описывают предельные чувствительности и погрешности детектора информационных параметров, зависимости от контролируемых параметров и влияющих факторов. Уточнение предельных значений оценки информационных параметров необходимо исследовать при подключении измерительных антенн.

### Список литературы

1. Раханов, К. Я. Обеспечение конфиденциальности информации в сети Интернет / К. Я. Раханов, Н. А. Раханова. Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2021. 192 с.
2. Железняк, В. К. Защита информации от утечки по техническим каналам / В. К. Железняк. СПб.: Санкт-Петербург. госуд. ун-т аэрокосмич. приборостр., 2006. 188 с.
3. Анализ ошибки равномерного квантования периодической импульсной последовательностью треугольной формы в спектральной области / В. К. Железняк [и др.] // Проблемы инфокоммуникаций. 2022. Т. 15, № 1. С. 39–45.
4. Математическая модель каналов утечки речевых сигналов при дискретно-квантованном представлении / В. К. Железняк [и др.] // Доклады БГУИР. 2020. Т. 18, № 4. С. 89–95. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-89-95>.
5. Железняк, В. К. Оценка разборчивости речи взаимной корреляцией сигнала линейной частотной модуляции в каналах утечки информации / В. К. Железняк, К. Я. Раханов, И. Б. Бураченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. 2015. № 12. С. 22–27.
6. Раханов, К. Я. Синтез программно-аппаратной системы оценки разборчивости речи методом ЛЧМ-сигнала: результаты эксперимента / К. Я. Раханов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. 2012. № 12. С. 20–26.

### References

1. Rakhanov K. Ya., Rakhanova N. A. (2021) *Ensuring the Information Confidentiality on the Internet*. Novopolotsk, Polotsk State University Publ. 192 (in Russian).
2. Zheleznyak V. K. (2006) *Protecting Information from Leaks Through Technical Channels*. Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Publ. 188 (in Russian).
3. Zheleznyak V., Rakhanov K., Lavrov S., Adamovskiy Y., Kharchenko S., Filippovich A., Baranovsky M. (2022) Analysis of the Uniform Quantization Error of a Triangular Periodic Pulse Sequence in the Spectral Domain. *Problemy Infokommunikacij = Infocommunication Problems*. 15 (1), 39–45 (in Russian).
4. Zheleznyak V. K., Lavrov S. V., Baranouski M. M., Filipovich A. G. (2020) Mathematical Model of Speech Signal Leakage Channels During Discrete-Quantified Conversion. *Doklady BGUIR = BSUIR Reports*. 18 (4), 89–95. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-89-95> (in Russian).
5. Zheleznyak V. K., Rakhanov K. Ya., Burachenok I. B. (2015) Estimation of Legibility of the Speech by Mutual Signal Correlation of Linear Frequency Modulation in Channels of Information Leakage. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya C, Fundamental'nye Nauki = Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences*. (12), 22–27 (in Russian).
6. Rakhanov K. Ya. (2012) Synthesis of Software and Hardware Systems Speech Estimation by LFM-Signal: Experimental Results. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya C. Fundamental'nye Nauki = Herald of Polotsk State University. Series C, Fundamental Sciences*. (12), 20–26 (in Russian).

### Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы внесли равный вклад в написание статьи / All authors have equally contributed to the writing of the article.

### Сведения об авторах

**Железняк В. К.**, д. т. н., профессор Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой

**Раханов К. Я.**, к. т. н., доцент кафедры вычислительных систем и сетей Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой

**Адамовский Е. Р.**, магистр, аспирант кафедры вычислительных систем и сетей Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой

### Адрес для корреспонденции

211440, Республика Беларусь,  
г. Новополоцк, ул. Блохина, 29  
Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой  
Тел.: +375 33 387-46-89  
E-mail: e.adamovsky@psu.by  
Адамовский Егор Русланович

### Information about the authors

**Zheleznyak V. K.**, Dr. of Sci. (Eng.), Professor of the Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

**Rahanov K. Ja.**, Cand of Sci., Assistant Professor at the Department of Computing Systems and Networks of the Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

**Adamovskiy Y. R.**, Master's Student, Postgraduate at the Department of Computing Systems and Networks of the Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

### Address for correspondence

211440, Republic of Belarus,  
Novopolotsk, Blokhina St., 29  
Euphrosyne Polotskaya  
State University of Polotsk  
Tel.: +375 33 387-46-89  
E-mail: e.adamovsky@psu.by  
Adamovskiy Yahor Ruslanovich





<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-41-48>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.396

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ШУМОВЫХ СИГНАЛОВ НА ВЫХОДАХ ПРИЕМНЫХ КАНАЛОВ С ОДИНОЧНЫМ РЕЗОНАНСНЫМ КОНТУРОМ

ВУ СУАН ЧИНЬ<sup>1</sup>, И. Н. ДАВЫДЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 11.10.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** При подавлении активных шумовых помех важной задачей является определение взаимной корреляционной функции и мощности шумовых сигналов на выходах приемных каналов. Решение этой задачи позволяет анализировать влияние неидентичностей частотных характеристик приемных каналов на качество компенсации активных шумовых помех. Анализ проводился для модели частотных характеристик приемных каналов в виде частотной характеристики одиночного резонансного контура в узкополосном приближении. Предполагалось, что частотная характеристика одного из каналов отличается от второго канала центральной частотой и полосой пропускания. При анализе использовалась приближенная аппроксимация частотной характеристики расстроенного канала в предположении незначительной расстройки параметров резонансного контура. Входной шум приемных каналов предполагался белым. Использование полученных результатов продемонстрировано при получении выражения для потенциальной эффективности одноканального автокомпенсатора.

**Ключевые слова:** корреляционные свойства, шум, одиночный резонансный контур, неидентичность частотных характеристик, качество компенсации шумовых помех.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Ву Суан Чинь. Корреляционные свойства шумовых сигналов на выходах приемных каналов с одиночным резонансным контуром / Ву Суан Чинь, И. Н. Давыденко // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 2. С. 41–48. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-41-48>.

## CORRELATION PROPERTIES OF NOISE SIGNALS AT THE OUTPUTS OF RECEIVING CHANNELS WITH A SINGLE RESONANT CIRCUIT

VU XUAN CHINH<sup>1</sup>, IHAR N. DAVYDZENKA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup>Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 11.10.2022

**Abstract.** When suppressing active noise interference, an important task is to determine the mutual correlation function and the power of noise signals at the outputs of receiving channels. The solution of this problem makes it possible to analyze the influence of non-identical frequency characteristics of receiving channels on the quality of compensation of active noise interference. The analysis was carried out for a model of the frequency characteristics of the receiving channels in the form of the frequency response of a single resonant circuit in a narrow-band

approximation. It was assumed that the frequency response of one of the channels differs from the second channel by the central frequency and bandwidth. In the analysis, an approximate approximation of the frequency response of the detuned channel was used, assuming a slight detuning of the parameters of the resonant circuit. The input noise of the receiving channels was assumed to be white. The use of the obtained results is demonstrated in obtaining an expression for the potential effectiveness of a single-channel autocompensator.

**Keywords:** correlation properties, noise, single resonant circuit, non-identity of frequency characteristics, quality of noise interference cancellation.

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

**For citation.** Vu Xuan Chinh, Davydenko I. N. (2023) Correlation Properties of Noise Signals at the Outputs of Receiving Channels with a Single Resonant Circuit. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 41–48. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-41-48> (in Russian).

## Введение

Задача определения взаимной корреляционной функции шумовых сигналов на выходах приемных каналов привлекает внимание исследователей [1, 2] и может быть использована при анализе влияния неидентичностей частотных характеристик приемных каналов на качество компенсации активных шумовых помех [3–7]. Использование приближенных аппроксимаций при записи неидентичностей частотных характеристик облегчает возможность анализа их влияния на качество компенсации численными методами [4] и дает возможность получения аналитических выражений, описывающих эффективность компенсации активных шумовых помех в условиях неидентичности частотных характеристик. В статье рассматривается простейший случай модели частотных характеристик приемных каналов в виде частотной характеристики одиночного резонансного контура в узкополосном приближении. Предполагается, что частотная характеристика одного из каналов отличается от второго канала центральной частотой и полосой пропускания. Для анализа использована приближенная аппроксимация частотной характеристики расстроенного канала. Получены выражение для взаимной корреляционной функции шумовых сигналов на выходах неидентичных приемных каналов, а также выражения для мощностей шума на выходах приемных каналов. При составлении выражений предполагалось, что входной шум является белым. Использование полученных формул проиллюстрировано при получении выражения для потенциальной эффективности одноканального автокомпенсатора активных шумовых помех в условиях неидентичности частотных характеристик приемных каналов с одиночными резонансными контурами.

## Взаимная корреляционная функция шумовых сигналов на выходах приемных каналов

Взаимная корреляционная функция сигналов на выходах основного и дополнительного приемного каналов может быть найдена по следующей формуле при одинаковом шумовом сигнале на их входах [3–5, 8]:

$$R_{10}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_N(\omega) k_1(j\omega) k_0^*(j\omega) e^{j\omega\tau} d\omega, \quad (1)$$

где  $k_0(j\omega)$ ,  $k_1(j\omega)$  – частотная характеристика основного и дополнительного каналов приема;  $S_N(\omega)$  – спектральная плотность мощности шума на входах каналов приема.

Представим входной шум в виде белого шума со спектральной плотностью  $N_{\Pi}$ . В этом случае выражение для взаимной корреляционной функции сигналов упростится

$$R_{10}(\tau) = \frac{N_{\Pi}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} k_1(j\omega) k_0^*(j\omega) e^{j\omega\tau} d\omega. \quad (2)$$

Частотная характеристика основного канала для случая одиночного резонансного контура в узкополосном приближении запишется в виде

$$k_0(j\omega) = \frac{1}{1 + j(\omega - \omega_0)T_f}, \quad (3)$$

где  $\omega_0$  – резонансная частота контура;  $T_f$  – постоянная времени контура.

Частотная характеристика дополнительного канала приема с учетом его отстройки от основного канала по полосе пропускания и частоте настройки определяется по формуле

$$k_1(j\omega) = \frac{1}{1 + j(\omega - \omega_0 - \delta\omega_0)(T_f + \delta T_f)}, \quad (4)$$

где  $\delta\omega_0$ ,  $\delta T_f$  – рассогласование по резонансной частоте и по постоянной времени.

Частотная характеристика дополнительного канала может быть преобразована следующим образом:

$$k_1(j\omega) = \frac{1}{1 + j(\omega - \omega_0)T_f \left( 1 + \frac{j(\omega - \omega_0)\delta T_f - j\delta\omega_0 T_f - j\delta\omega_0 \delta T_f}{1 + j(\omega - \omega_0)T_f} \right)}. \quad (5)$$

Учитывая приближенное равенство  $(1 - \alpha)^{-1} \approx 1 - \alpha$  для малых значений аргумента  $\alpha$ , частотную характеристику дополнительного канала можно записать в виде

$$k_1(j\omega) \approx \frac{1}{1 + j(\omega - \omega_0)T_f} \left[ 1 - \frac{j(\omega - \omega_0)\delta T_f - j\delta\omega_0 T_f}{1 + j(\omega - \omega_0)T_f} \right]. \quad (6)$$

Взаимная корреляционная функция выходных сигналов двух взаимно расстроенных контуров при использовании аппроксимации частотных характеристик основного и дополнительного каналов в виде (3) и (6) описывается следующим интегралом:

$$R_{10}(\tau) = \frac{N_{\Pi}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} k_1(j\omega) k_0^*(j\omega) e^{j\omega\tau} d\omega = \frac{N_{\Pi}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_f^2} \left[ 1 - \frac{j(\omega - \omega_0)\delta T_f - j\delta\omega_0 T_f}{1 + j(\omega - \omega_0)T_f} \right] e^{j\omega\tau} d\omega. \quad (7)$$

После ряда математических преобразований и использования замены переменной вида  $\omega' = \omega - \omega_0$  выражение (7) примет следующий вид:

$$R_{10}(\tau) = e^{j\omega_0\tau} \frac{N_{\Pi}}{2\pi} \left[ I_1 - \frac{\delta T_f}{T_f} I_2 + j\delta\omega_0 T_f I_3 \right], \quad (8)$$

где  $I_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{j\omega\tau}}{1 + \omega^2 T_f^2} d\omega$ ;  $I_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{j\omega T_f e^{j\omega\tau}}{(1 + \omega^2 T_f^2)(1 + j\omega T_f)} d\omega$ ;  $I_3 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{j\omega\tau}}{(1 + \omega^2 T_f^2)(1 + j\omega T_f)} d\omega$ .

Покажем, что интеграл  $I_2$  может быть получен в виде линейной комбинации выражений  $I_1$  и  $I_3$ . В результате преобразований получим

$$I_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{j\omega T_f e^{j\omega\tau}}{(1 + \omega^2 T_f^2)(1 + j\omega T_f)} d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{e^{j\omega\tau}}{(1 + \omega^2 T_f^2)} - \frac{e^{j\omega\tau}}{(1 + \omega^2 T_f^2)(1 + j\omega T_f)} \right] d\omega. \quad (9)$$

С учетом (8) для интеграла  $I_2$  можно окончательно записать

$$I_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{j\omega T_f e^{j\omega\tau}}{(1 + \omega^2 T_f^2)(1 + j\omega T_f)} d\omega = I_1 - I_3.$$

Следовательно, интегральное выражение (8) для взаимной корреляционной функции переписывается следующим образом:

$$R_{10}(\tau) = e^{j\omega_0\tau} \frac{N_{\Pi}}{2\pi} \left[ \left( 1 - \frac{\delta T_f}{T_f} \right) I_1 + \left( j\delta\omega_0 T_f + \frac{\delta T_f}{T_f} \right) I_3 \right]. \quad (10)$$

Интеграл  $I_1$  приведем к табличному виду

$$I_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{1 + \omega^2 T_f^2} e^{j\omega\tau} d\omega = \frac{1}{T_f^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{j\omega\tau}}{\frac{1}{T_f^2} + \omega^2} d\omega.$$

Учитывая, что согласно [9, с. 323]

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{j\lambda x}}{x^2 + z^2} dx = \frac{\pi}{z} e^{-|\lambda|z},$$

конечное выражение для интеграла  $I_1$  при предположении  $\lambda = \tau$ ,  $z = \frac{1}{T_f}$  запишется в следующем виде:

$$I_1 = \frac{\pi}{T_f} e^{\frac{-|\tau|}{T_f}}. \quad (11)$$

Преобразуем интеграл  $I_3$  к виду, пригодному для использования табличного интеграла:

$$I_3 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(1 + \omega^2 T_f^2)(1 + j\omega T_f)} e^{j\omega\tau} d\omega = \frac{1}{T_f^3} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\left(\frac{1}{T_f} + j\omega\right)^{-1} e^{-j\omega(-\tau)}}{\frac{1}{T_f^2} + \omega^2} d\omega. \quad (12)$$

При вычислении интеграла  $I_3$  для случая отрицательных значений аргумента  $\tau < 0$  используем табличный интеграл [10, с. 337]

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(\beta + jx)^{-\nu} e^{-jpx}}{\gamma^2 + x^2} dx \Big|_{p>0} = \frac{\pi}{\gamma} (\beta + \gamma)^{-\nu} e^{-p\gamma}. \quad (13)$$

В этом случае для интеграла  $I_3$ , полагая  $\gamma = \frac{1}{T_f}$ ,  $\beta = \frac{1}{T_f}$ ,  $\nu = 1$ ,  $p = -\tau$  ( $\tau < 0 \Rightarrow p > 0$ ), с учетом (12) можно получить

$$I_3|_{\tau<0} = \frac{\pi}{2T_f} e^{\frac{-|\tau|}{T_f}}. \quad (14)$$

Таким образом, для отрицательных значений аргумента  $\tau < 0$  с учетом выражений (10), (11), (14)

$$R_{10}(\tau)|_{\tau<0} = N_{\Pi} e^{j\omega_0\tau} \frac{e^{\frac{-|\tau|}{T_f}}}{2T_f} \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{\delta T_f}{T_f} + j \frac{1}{2} \delta\omega_0 T_f \right]. \quad (15)$$

Преобразуем интеграл  $I_3$  для случая положительных значений аргумента  $\tau > 0$  с использованием подстановки  $e^{j\omega\tau} = 2j \sin(\omega\tau) + e^{-j\omega\tau}$

$$I_3 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{j\omega\tau}}{(1 + \omega^2 T_f^2)(1 + j\omega T_f)} d\omega = I_4 + I_5, \quad (16)$$

где  $I_4 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2j \sin(\omega\tau)}{(1 + \omega^2 T_f^2)(1 + j\omega T_f)} d\omega$ ;  $I_5 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-j\omega\tau}}{(1 + \omega^2 T_f^2)(1 + j\omega T_f)} d\omega$ .

Представим интеграл  $I_5$  в следующем виде, пригодном для использования табличного интеграла:

$$I_5 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-j\omega\tau}}{(1 + \omega^2 T_f^2)(1 + j\omega T_f)} d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-j\omega\tau}}{T_f^2 \left(\frac{1}{T_f^2} + \omega^2\right) T_f \left(\frac{1}{T_f} + j\omega\right)} d\omega.$$

Используя табличный интеграл (13) и полагая  $\gamma = \frac{1}{T_f}$ ,  $\beta = \frac{1}{T_f}$ ,  $\nu = 1$ ,  $p = \tau$  ( $\tau > 0 \Rightarrow p > 0$ ), для интеграла  $I_5$  можно получить:

$$I_5|_{\tau>0} = \frac{\pi}{2T_f} e^{\frac{-|\tau|}{T_f}}. \quad (17)$$

Выражение для интеграла  $I_4$  преобразуем следующим образом:

$$I_4 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2j \sin(\omega\tau)}{(1 + \omega^2 T_f^2)(1 + j\omega T_f)} d\omega = 2j \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(\omega\tau)}{(1 + \omega^2 T_f^2)^2} d\omega + 2T_f \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\omega \sin(\omega\tau)}{(1 + \omega^2 T_f^2)^2} d\omega.$$

Учитывая четность и нечетность подынтегральных функций и равенство нулю определенного интеграла от нечетной функции  $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{j\omega T_f}{(1 + \omega^2 T_f^2)^2} d\omega = 0$ , можно окончательно записать

$$I_4 = 2T_f \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\omega \sin(\omega\tau)}{(1 + \omega^2 T_f^2)^2} d\omega = 4T_f \int_0^{+\infty} \frac{\omega \sin(\omega\tau)}{(1 + \omega^2 T_f^2)^2} d\omega = \frac{4}{T_f^3} \int_0^{+\infty} \frac{\omega \sin(\omega\tau)}{\left(\frac{1}{T_f^2} + \omega^2\right)^2} d\omega.$$

Используя табличный интеграл вида [10, с. 424]

$$\int_0^{+\infty} \frac{x \sin(ax)}{(b^2 + x^2)^2} dx = \frac{\pi}{4b} a e^{-ab} [a > 0, b > 0],$$

выражение для интеграла  $I_4$  при  $a = \tau$ ,  $b = \frac{1}{T_f}$  запишется в следующем виде:

$$I_4|_{\tau > 0} = \frac{\pi}{T_f^2} |\tau| e^{-\frac{|\tau|}{T_f}}. \quad (18)$$

Таким образом, интеграл  $I_3$  для случая положительных значений аргумента  $\tau > 0$  в соответствии с (16)–(18) определяется выражением

$$I_3|_{\tau > 0} = I_4|_{\tau > 0} + I_5|_{\tau > 0} = \frac{1}{2} \frac{\pi}{T_f} e^{-\frac{|\tau|}{T_f}} \left( 2 \frac{|\tau|}{T_f} + 1 \right). \quad (19)$$

Соответственно для положительных значений аргумента  $\tau > 0$  с учетом (10), (11), (19) можно записать

$$R_{10}(\tau)|_{\tau > 0} = N_{\Pi} e^{j\omega_0 \tau} \frac{e^{-\frac{|\tau|}{T_f}}}{2T_f} \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{\delta T_f}{T_f} \left( 1 - 2 \frac{|\tau|}{T_f} \right) + j \frac{1}{2} \delta \omega_0 T_f \left( 1 + 2 \frac{|\tau|}{T_f} \right) \right]. \quad (20)$$

Таким образом, приближенная взаимная корреляционная функция выходных сигналов двух взаимно расстроенных контуров определяется следующим результирующим выражением:

$$R_{10}(\tau) = N_{\Pi} e^{j\omega_0 \tau} \frac{e^{-\frac{|\tau|}{T_f}}}{2T_f} \begin{cases} \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{\delta T_f}{T_f} \left( 1 - 2 \frac{|\tau|}{T_f} \right) + j \frac{1}{2} \delta \omega_0 T_f \left( 1 + 2 \frac{|\tau|}{T_f} \right) \right], & \tau \geq 0; \\ \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{\delta T_f}{T_f} + j \frac{1}{2} \delta \omega_0 T_f \right], & \tau \leq 0. \end{cases} \quad (21)$$

### Мощности шумовых сигналов на выходах приемных каналов

Автокорреляционная функция шумового сигнала на выходе основного канала приема вытекает из (21) для взаимной корреляционной функции при выполнении условия  $\delta T_f = \delta \omega_0 = 0$  и описывается выражением

$$R_0(\tau) = R_{10}(\tau)|_{\delta T_f = \delta \omega_0 = 0} = \frac{N_{\Pi}}{2T_f} e^{j\omega_0 \tau} \exp\left(-\frac{|\tau|}{T_f}\right). \quad (22)$$

В этом случае мощность помехи на выходе основного канала приема

$$2\sigma_0^2 = R_0(0) = \frac{N_{\Pi}}{2T_f}. \quad (23)$$

Автокорреляционная функция сигнала помехи на выходе компенсационного канала приема вытекает из выражения (2) для взаимной корреляционной функции и с использованием подстановки  $k_0(j\omega) = k_1(j\omega)$  может быть найдена по следующей формуле:

$$R_1(\tau) = \frac{N_{\Pi}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |k_1(j\omega)|^2 e^{j\omega\tau} d\omega. \quad (24)$$

Мощность помехи на входе компенсационного канала приема определяется выражением

$$2\sigma_1^2 = R_1(0) = \frac{N_{\Pi}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |k_1(j\omega)|^2 d\omega. \quad (25)$$

В соответствии с (6), используя подстановку  $\omega - \omega_0 = \Delta\omega$  и учитывая равенство нулю определенного интеграла  $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Delta\omega}{(1 + \Delta\omega^2 T_f^2)^2} d\Delta\omega = 0$ , можно получить

$$R_1(0) = R_0(0) + \frac{N_{\Pi}}{2\pi} \left[ (\delta T_f^2 - 2T_f \delta T_f) A_1 + (\delta\omega_0 T_f)^2 A_3 \right], \quad (26)$$

где  $A_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Delta\omega^2}{(1 + \Delta\omega^2 T_f^2)^2} d\Delta\omega$ ;  $A_3 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(1 + \Delta\omega^2 T_f^2)^2} d\Delta\omega$ .

Интегралы  $A_1$  и  $A_3$  находятся по следующим формулам:

$$A_1 = 2 \int_0^{+\infty} \frac{\Delta\omega^2}{(1 + \Delta\omega^2 T_f^2)^2} d\Delta\omega = \frac{2}{T_f^3} \int_0^{+\infty} \frac{x^2}{(1 + x^2)^2} dx = \frac{2}{T_f^3} \left( \int_0^{+\infty} \frac{1}{1 + x^2} dx - \int_0^{+\infty} \frac{1}{(1 + x^2)^2} dx \right) = \frac{\pi}{2T_f^3}; \quad (27)$$

$$A_3 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(1 + \Delta\omega^2 T_f^2)^2} d\Delta\omega = \frac{2}{T_f} \int_0^{+\infty} \frac{1}{(1 + x^2)^2} dx = \frac{\pi}{2T_f}. \quad (28)$$

Следовательно, с учетом (26)–(28) для мощности помехи на выходе дополнительного канала приема можно записать

$$2\sigma_1^2 = R_1(0) = R_0(0) + \frac{N_{\Pi}}{2\pi} \left[ (\delta T_f^2 - 2T_f \delta T_f) A_1 + (\delta\omega_0 T_f)^2 A_3 \right] = \frac{N_{\Pi}}{2T_f} \left[ 1 + \frac{\delta T_f^2}{2T_f^2} - \frac{\delta T_f}{T_f} + \frac{1}{2} (\delta\omega_0 T_f)^2 \right]. \quad (29)$$

### Потенциальная эффективность одноканального автокомпенсатора активной шумовой помехи

Выражение для мощности помехи на выходе одноканального автокомпенсатора активных шумовых помех описывается выражением [3, 4]

$$P_{\text{вых, min}} = 2\sigma_0^2 - \frac{|R_{10}(0)|^2}{2\sigma_1^2}. \quad (30)$$

С учетом (21), (23), (29) формула для мощности помехи на выходе автокомпенсатора после отбрасывания слагаемых большей степени малости имеет следующий приближенный вид:

$$P_{\text{вых, min}} \approx \frac{N_{\Pi}}{2T_f} \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{\delta T_f}{T_f} \right)^2 + \frac{1}{4} (\delta\omega_0 T_f)^2 \right]. \quad (31)$$

Соответственно выражение для потенциальной эффективности одноканального автокомпенсатора в условиях неидентичности частотных характеристик одиночного резонансного контура описывается выражением

$$K_{\Pi} = \frac{2\sigma_0^2}{P_{\text{вых, min}}} \approx \frac{4}{\left(\frac{\delta T_f}{T_f}\right)^2 + (\delta\omega_0 T_f)^2}. \quad (32)$$

Приближенное выражение (32) при малых значениях величин  $\delta T_f$  и  $\delta\omega_0$  соответствует точному решению, полученному в [5] для широкополосного представления частотных характеристик одиночного резонансного контура.

### Заключение

Для случая приемных каналов в виде одиночных резонансных контуров получены формулы взаимной корреляционной функции и мощностей выходных шумовых сигналов приемных каналов. Частотные характеристики каналов представлены в узкополосном приближении. Частотная характеристика дополнительного канала при небольшой неидентичности по отношению к основному каналу подвергнута дополнительному упрощению. Использована модель белого входного шума. Полученные результаты применялись при получении выражения для потенциальной эффективности одноканального автокомпенсатора в условиях неидентичности частотных характеристик каналов приема.

### Список литературы

1. Максимов, М. В. Взаимная корреляция флуктуационных помех на выходе частотных фильтров / М. В. Максимов // Радиотехника. 1956. № 11. С. 28–38.
2. Черняк, Ю. Б. Взаимная корреляция напряжений шумов на выходе усилителей с перекрывающимися частотными характеристиками / Ю. Б. Черняк // Радиотехника и электроника. 1960. № 4. С. 551–561.
3. Farina, A. Single-Sidelobe Canceller: Theory and Evaluation / A. Farina // IEEE Transactions, AES-13. 1977. No 6. P. 690–699. DOI: 10.1109/TAES.1977.308510.
4. Gerlach, K. The Effects of IF Bandpass Mismatch Errors on Adaptive Cancellation / K. Gerlach // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1990. Vol. 26, No 3. P. 455–468. DOI: 10/1109/7.106122.
5. Богачев, В. А. Подавление помех системой адаптивной компенсации при неидентичных частотных характеристиках приемных каналов / В. А. Богачев. Новосибирск: Науч.-исслед. ин-т измерит. приборов, 1999.
6. Farina, A. Digital Equalization in Adaptive Spatial Filtering for Radar Systems: a Survey / A. Farina // Signal Processing. 2003. Vol. 83, No 1. P. 11–29. DOI: 10.1016/S0165-1684(02)00389-4.
7. Анализ влияния неидентичности приемных каналов радиолокационных станций на работу адаптивного когерентного компенсатора помех / В. Н. Антипов [и др.] // Радиотехника. 2020. Т. 84, № 1. С. 33–41. DOI: 10.18127/j00338486-202001(01)-04.
8. Тихонов, В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. М.: Радио и связь, 2004.
9. Прудников, А. П. Интегралы и ряды. Элементарные функции / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О. И. Маричев. М.: Наука, 1981.
10. Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. М.: Госуд. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1963.

### References

1. Maksimov M. V. (1956) Mutual Correlation of Fluctuation Noise at the Output of Frequency Filters. *Radiotekhnika = Radioengineering*. (11), 28–38 (in Russian).
2. Cherniak Yu. B. (1960) Mutual Correlation of Voltage Noise at the Output of Amplifiers with Overlapping Frequency Characteristics. *Radiotekhnika i Elektronika = Radio Engineering and Electronics*. (4), 551–561 (in Russian).
3. Farina A. (1977) Single-Sidelobe Canceller: Theory and Evaluation. *IEEE Transactions, AES-13*. (6), 690–699. DOI: 10.1109/TAES.1977.308510.
4. Gerlach K. (1990) The Effects of IF Bandpass Mismatch Errors on Adaptive Cancellation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 26 (3), 455–468. DOI: 10/1109/7.106122.
5. Bogachev V. A. (1999) *Suppression of Interference by Adaptive Compensation System with Non-Identical Frequency Characteristics of Receiving Channels*. Novosibirsk, Research Institute of Measuring Instruments (in Russian).

6. Farina A. (2003) Digital Equalization in Adaptive Spatial Filtering for Radar Systems: a Survey. *Signal Processing*. 83 (1), 11–29. DOI: 10.1016/S0165-1684(02)00389-4.
7. Antipov V. N., Koltyshev E. E., Frolov A. Yu., Jankowski V. T. (2020) Analysis of the Impact of Non-Identity of the Receiving Channels of Radar Stations on the Work of Adaptive Coherent Jammer. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 84 (1), 33–41. DOI: 10.18127/j00338486-202001(01)-04 (in Russian).
8. Tihonov V. I., Harisov V. N. (2004) *Statistical Analysis and Synthesis of Radio Engineering Devices and Systems*. Moscow, Radio and Communication Publ. (in Russian).
9. Prudnikov A. P., Brichkov Yu. A., Marichev O. I. (1981) *Integrals and Series. Elementary Functions*. Moscow, Nauka Publ. (in Russian).
10. Gradshteyn I. S., Ryzhik I. M. (1963) *Table of Integrals, Series and Products*. Moscow, State Publishing House of Physical and Mathematical Literature (in Russian).

### Вклад авторов

Давыденко И. Н. осуществил постановку задачи для проведения исследования, подготовил рукопись статьи.

Vu Xuan Chinh выполнил аналитические преобразования.

### Authors' contribution

Davydzenka I. N. formulated the task for the study, prepared the manuscript of the article.

Vu Xuan Chinh performed analytical transformations.

### Сведения об авторах

**Ву Суан Чинь**, магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Давыденко И. Н.**, к. т. н., доцент, ученый секретарь Центра радиотехники Национальной академии наук Беларуси

#### Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 15/5, каб. 420  
Центр радиотехники  
Национальной академии наук Беларуси  
Тел.: +375 29 776-85-52  
E-mail: igord1@tut.by  
Давыденко Игорь Николаевич

### Information about the authors

**Vu Xuan Chinh**, Master's Student of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Davydzenka I. N.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Scientific Secretary of the Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus

#### Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 15/5, room 420  
Radio Engineering Center  
of the National Academy of Sciences of Belarus  
Tel.: +375 29 776-85-52  
E-mail: igord1@tut.by  
Davydzenka Ihar Nikolaevich





<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-49-57>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.391.82

## ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРИФЕРИЙНОГО РАДИООБОРУДОВАНИЯ СЕТЕЙ 4G/5G НА УРОВЕНЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА, СОЗДАВАЕМОГО В ЗДАНИЯХ

В. И. МОРДАЧЕВ

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

*Поступила в редакцию 22.09.2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Известные результаты исследований радиочастотного электромагнитного фона, создаваемого в зданиях радиочастотным электромагнитным излучением периферийного оборудования систем мобильной связи 4G/5G, включая оборудование массовой межмашинной связи/интернета вещей (mMTC/IoT) и абонентских устройств беспроводной телефонии и передачи данных, основаны на использовании модели равномерного случайного распределения этого оборудования по внутреннему объему здания. Ее адекватность при анализе ряда сценариев 4G/5G подвергается сомнению в связи с тем, что за исключением абонентских устройств, основная часть располагаемого в зданиях периферийного радиооборудования mMTC/IoT размещается на стенах помещений с тенденцией их группирования вблизи мест пересечения плоских поверхностей стен, пола и потолка. В статье приведены результаты сравнительных оценок средней интенсивности электромагнитного фона внутри здания при различном характере распределения множества точечных источников радиочастотных электромагнитных полей по внутреннему пространству здания: при их однородном равномерном распределении по его объему и при двух типах неоднородности этого распределения – при равномерном распределении источников по его внутренним поверхностям и равномерном их распределении по линиям пересечения этих поверхностей. Эти результаты свидетельствуют об относительно малом влиянии рассмотренных видов неоднородности пространственного размещения источников излучений на оценки средней интенсивности создаваемого ими электромагнитного фона внутри здания при использовании методики, основанной на представлении внутреннего пространства здания в виде совокупности телесных углов, отдельные элементы внутреннего пространства которых характеризуются постоянством средней объемной плотности источников и усредненных условий распространения радиоволн в направлении точки наблюдения.

**Ключевые слова:** мобильная связь, 4G, 5G, периферийное устройство, электромагнитное излучение, электромагнитный фон, распространение радиоволн, электромагнитная безопасность.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Мордачев, В. И. Влияние неоднородности пространственного распределения периферийного радиооборудования сетей 4G/5G на уровень электромагнитного фона, создаваемого в зданиях / В. И. Мордачев // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 2. С. 49–57. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-49-57>.

## INFLUENCE OF THE HETEROGENEITY OF SPATIAL DISTRIBUTION OF PERIPHERAL RADIO EQUIPMENT OF 4G/5G NETWORKS ON THE LEVEL OF ELECTROMAGNETIC BACKGROUND CREATED IN BUILDINGS

VLADIMIR I. MORDACHEV

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

*Submitted 22.09.2022*

**Abstract.** Known results of studies of the radio frequency electromagnetic background generated in buildings by electromagnetic radiation from the peripheral equipment of 4G/5G mobile communications, including equipment for massive machine-type communication/Internet of things (mMTC/IoT) and user's devices for wireless telephony and data transmission, are based on the use of a model of uniform random distribution of this equipment over the building internal space. The adequacy of this model for the analysis of a number of 4G/5G scenarios is questioned due to the fact that, excluding user's devices, the main part of the mMTC/IoT peripheral radio equipment located in buildings is distributed along the walls of the premises with a tendency to concentrate them near the intersections of flat surfaces of walls, floors and ceilings. Paper presents the results of comparative estimates of the average intensity of electromagnetic background inside building for different types of distribution of the set of point sources of RF electromagnetic fields over the building interior space: for their uniform distribution over internal space and for two types of heterogeneity of this distribution: for uniform distribution of sources over building internal surfaces and with their uniform distribution along the lines of intersection of these surfaces. Results of this analysis indicate a relatively small effect of the considered types of heterogeneity in the spatial distribution of radiation sources on the estimates of the electromagnetic background average intensity created by these sources inside the building, when using a technique based on the representation of the internal space of a building as a set of solid angles, which internal space separate sections are characterized by the constancy of the sources average space density and by the average conditions for radio waves propagation in the direction of the observation point.

**Keywords:** mobile communications, 4G, 5G, peripheral equipment, electromagnetic radiation, electromagnetic background, radio waves propagation, electromagnetic safety.

**Conflict of interests.** The author declares no conflict of interests.

**For citation.** Mordachev V. I. (2023) Influence of the Heterogeneity of Spatial Distribution of Peripheral Radio Equipment of 4G/5G Networks on the Level of Electromagnetic Background Created in Buildings. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 49–57. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-49-57> (in Russian).

### Введение

В [1, 2] предложена методика интегральной оценки интенсивности электромагнитного фона (ЭМФ), создаваемого множеством излучающих периферийных устройств (ПУ) радиосвязи и беспроводной передачи данных в многоэтажных зданиях, основанная на:

– использовании модели случайного равномерного распределения ПУ равной эквивалентной изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ), представляемых в виде точечных источников радиочастотных электромагнитных полей (ЭМП РЧ), по внутреннему объему здания со средней плотностью  $\rho$  [ПУ/м<sup>3</sup>], либо по внутренним объемам его  $I$  отдельных частей, либо отдельных элементов городской застройки с известными плотностями  $\rho_i, i \in [1, I]$ ;

– использовании известной интегральной эмпирической модели [3–5] распространения радиоволн (РРВ) в зданиях;

– определении интенсивности ЭМФ в форме скалярной суммы значений плотности потока мощности (ППМ) ЭМП РЧ, создаваемых в точке наблюдения (ТН) множеством излучающих ПУ, распределенных в окружающем пространстве;

– представлении всего окружающего пространства вокруг ТН внутри здания и, при необходимости, вне его в виде совокупности относительно узких телесных углов  $\Omega_j, j \in [1, J]$ , стягиваемых элементами внешних поверхностей здания либо поверхностями элементов городской застройки и в сумме составляющих полный телесный угол  $\Omega_\Sigma = 4\pi$ .

Последнее является принципиальным преимуществом методики, обеспечивающим существование первых начальных моментов распределений вероятности значений ППМ ЭМП РЧ,

создаваемых ближайшими точечными источниками ЭМП РЧ, располагаемыми внутри каждого из телесных углов  $\Omega_j$ ,  $j \in [1, J]$ , и оказывающими наибольшее влияние на интенсивность ЭМФ в ТН. Это впервые обеспечило возможность разработки практического алгоритма интегральной оценки средней интенсивности ЭМФ в ТН, создаваемого источниками ЭМП РЧ как из окружающего пространства внутри здания, так и за его пределами, в виде скалярной суммы средних значений ППМ ЭМП РЧ в ТН. Результаты обсуждения в [2] этой методики подтвердили ее актуальность и практическую значимость, но выявили необходимость анализа ее погрешности, связанной с использованием равномерного объемного распределения источников, поскольку основная часть располагаемого в зданиях периферийного радиооборудования mMTC/LoT сетей 4G/5G размещается на стенах помещений с тенденцией их группирования вблизи мест пересечения плоских поверхностей стен, пола и потолка.

Цель исследований – сравнительный анализ оценок средней интенсивности ЭМФ в ТН внутри здания по принципам [1, 2] при различном характере распределения множества точечных источников ЭМП РЧ равной ЭИИМ по внутреннему пространству помещения: при их однородном равномерном 3D-распределении по его объему и при двух типах неоднородности этого распределения – при равномерном 2D-распределении того же количества источников по его внутренним поверхностям и при равномерном 1D-распределении данных источников по линиям пересечения этих поверхностей.

### Методика анализа

Оценки относительной интенсивности ЭМФ при различном характере распределения источников внутри зданий выполнены по традиционной методике [1, 2, 6], основанной на использовании известных эмпирических моделей условий РРВ в зданиях и различных вариантов распределения излучающих ПУ в пространстве (однородного и неоднородных).

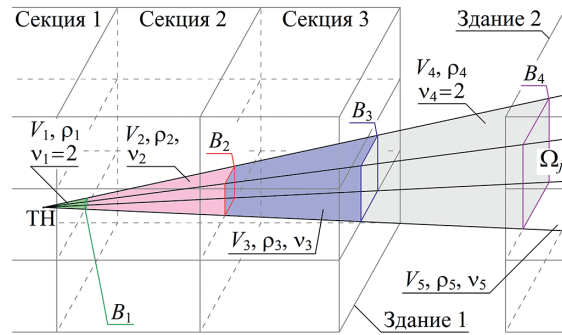
*Модель условий распространения радиоволн в зданиях.* Принимая во внимание интегральный характер оценок средней интенсивности ЭМФ в ТН в рассматриваемых случаях, использована следующая известная обобщенная эмпирическая модель условий РРВ в зданиях [3–5], определяющая зависимость их затухания  $L_t$  от расстояния  $R$  до их источника:

$$L_t(R) = L_C \left( \frac{R}{R_0} \right)^\nu, \quad L_C = \text{const}, \quad (1)$$

где  $\nu$  – коэффициент, определяющий степень увеличения затухания радиоволн с увеличением расстояния до ТН и в усредненной форме отражающий влияние внутренних препятствий (стен, перекрытий, оборудования и т. п.) на процесс РРВ;  $R_0$  – «эталонное» расстояние, определяемое с учетом особенностей расположения ТН внутри либо вне здания.

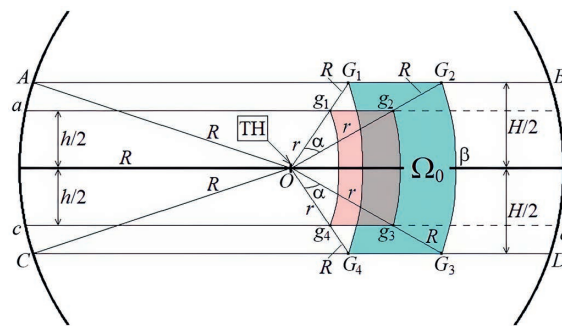
Без учета «квазиволноводного» характера РРВ вдоль коридоров и помещений различного назначения в пределах прямой видимости (для этих условий  $\nu \approx 1,6$ –1,8), для источников дальней зоны (вне помещения, в котором находится ТН), а также для частот диапазона FR1 5G (основной части диапазона УВЧ и нижней части диапазона СВЧ)  $\nu \approx 4$ –6 для РРВ внутри офисных и жилых зданий,  $\nu \approx 2$ –3 для РРВ в производственных зданиях,  $\nu \approx 3$ –5 для сотовой связи в условиях затенения городской застройкой для ТН вне помещений вблизи земной поверхности. Величина  $R_0$  определяется эмпирически для каждого случая с учетом взаимного расположения ТН и внутренних поверхностей помещения либо затеняющих элементов застройки. Для источников ближней зоны (в помещении, где находится ТН) для  $R_0 = 1$  м и  $R_0 \leq R \leq 10$  м использована модель РРВ в свободном пространстве ( $\nu = 2$ ) [5].

В представленном на рис. 1 примере пространство внутри телесного угла  $\Omega_j$  с вершиной в ТН, располагаемой в секции 1 здания 1, разделено на ближнюю зону объема  $V_1$ , охватывающую часть внутреннего пространства секции 1, на элементы  $V_2, V_3$  секций 2, 3 здания 1, на часть  $V_4$  внешнего пространства и часть  $V_5$  внутреннего пространства соседнего здания 2. Отдельные части внутреннего пространства угла  $\Omega_j$ , отличающиеся средней пространственной плотностью ПУ  $\rho_i$  и условиями РРВ  $\nu_i$ ,  $i \in [1, 5]$ , в направлении на ТН, разделяются стягивающими сферическими поверхностями  $B_1$ – $B_4$ , аппроксимирующими реальные поверхности раздела (стены, перекрытия и т. п.).



**Рис. 1.** Пример разделения внутреннего пространства здания в телесном угле  $\Omega_j$  на области  $V_1-V_5$   
**Fig. 1.** An example of the division of the building inner space covered by the solid angle  $\Omega_j$  into parts  $V_1-V_5$

Модели пространственного размещения периферийных устройств – источников радиочастотных электромагнитных полей. Рассмотрим относительно небольшой телесный угол  $\Omega_0 < \pi$  с вершиной в ТН, совпадающей с центром  $O$  сфер с радиусами  $R$  и  $r = kR, k < 1$ , стягиваемый внешней и внутренней поверхностями  $G_1G_2G_3G_4$  и  $g_1g_2g_3g_4$  усеченной сферической пирамиды (УСП)  $G_1G_2G_3G_4g_1g_2g_3g_4$ , образованной радиальными ребрами  $g_1G_1, g_2G_2, g_3G_3$  и  $g_4G_4$ , а также азимутальным  $\alpha$  и зенитным  $\beta$  углами (рис. 2). Данная УСП использована для аппроксимации геометрии анализируемого внутреннего пространства здания, располагаемого в дальней зоне по отношению к ТН.



**Рис. 2.** Представление анализируемой области внутреннего пространства здания в виде усеченной сферической пирамиды  $G_1G_2G_3G_4g_1g_2g_3g_4$   
**Fig. 2.** Representation of the analyzed part of the building internal space in the form of truncated spherical pyramid  $G_1G_2G_3G_4g_1g_2g_3g_4$

Принимая во внимание сложность как внутренней структуры зданий, так и конфигурации внешнего пространства городской застройки вокруг них, при реализации методики [1, 2], предполагающей представление пространства вокруг ТН в виде достаточно большого числа узких углов  $\Omega_j, j \in [1, J]$ , интерес представляет случай, когда анализируемая УСП ограничена сравнительно малыми азимутальным  $\alpha$  и зенитным  $\beta$  углами. Модель (1) условий РРВ удобно представить в следующем виде:

$$Z = \frac{\text{const}}{x^v}, \quad r \leq x \leq R; \tag{2}$$

$$Z_{\min} = \frac{\text{const}}{R^v}; \quad Z_{\max} = \frac{\text{const}}{r^v} = \frac{\text{const}}{k^v R^v}; \quad Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max},$$

где  $Z$  – плотность потока мощности, Вт/м<sup>2</sup>, ЭМП РЧ в ТН от источника, удаленного на расстояние  $x$ ;  $Z_{\min}, Z_{\max}$  – минимальное и максимальное значения ППМ ЭМП РЧ от источников, располагаемых в пределах рассматриваемой УСП.

Определим средние уровни ЭМФ в точке наблюдения  $O$  при следующих вариантах пространственного распределения одинакового количества излучающих ПУ в рассматриваемой УСП.

1. Источники располагаются в объеме  $V_{TSP}$  УСП (TSP – truncated spherical pyramid – усеченная сферическая пирамида) равномерно случайно со средней плотностью  $\rho_V$  [ПУ/м<sup>3</sup>] так, что их чис-

ло в ее объеме  $N_{V\Sigma} = V_{TSP}\rho_V$ . Объем  $V_{TSP}$  рассматриваемой УСП  $G_1G_2G_3G_4g_1g_2g_3$  равен  $\alpha/2\pi$ -й части разности двух величин, из них:

– первая – объем  $V_{ABDC}$  шарового слоя  $ABDC$  высотой  $H$  за вычетом объемов  $V_{OAB} = V_{OCD} = V_{cout}$  двух внешних конусов  $OAB$  и  $OCD$  с образующей  $R$  и радиусом основания  $R\cos(\beta/2)$ ;

– вторая – объем  $V_{abdc}$  шарового слоя  $abdc$  высотой  $h$  за вычетом объемов  $V_{aOb} = V_{cOd} = V_{cin}$  внутренних конусов  $aOb$  и  $cOd$  с образующей  $r$  и радиусом основания  $r\cos(\beta/2)$ .

Таким образом:

$$V_{TSP} = \frac{\alpha}{2\pi}(V_{ABDC} - 2V_{cout} - V_{abdc} + 2V_{cin}); \quad N_{V\Sigma} = \rho_V V_{TSP}. \quad (3)$$

Суммарная интенсивность  $Z_{\Sigma V}$  ЭМФ в ТН от излучающих ПУ, расположенных равномерно случайно в объеме УСП, запишется в виде [1, 2]:

$$Z_{\Sigma V} = N_{V\Sigma} m_{1V}(Z) \approx \frac{3Z_{\min}^{\frac{3}{v}} Z_{\max}^{\frac{3}{v}}}{(v-3) \left( Z_{\max}^{\frac{3}{v}} - Z_{\min}^{\frac{3}{v}} \right)} \left( Z_{\max}^{1-\frac{3}{v}} - Z_{\min}^{1-\frac{3}{v}} \right) \frac{\alpha R^3 \rho}{3} (1-k^3) \sin \beta, \quad v \neq 3; \quad (4)$$

$$Z_{\Sigma V} = N_{V\Sigma} m_{1V}(Z) \approx \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}} \cdot \frac{\alpha R^3 \rho}{3} (1-k^3) \sin \beta, \quad v = 3, \quad (5)$$

где  $m_{1V}(Z)$  – матожидание значений ППМ этих ПУ в ТН.

2.  $N_{V\Sigma}$  источников располагаются случайно равномерно с плотностью  $\rho_S$  на внутренней, внешней и боковых поверхностях (гранях) анализируемой УСП. Площади  $S_{R\alpha\beta}$  и  $S_{r\alpha\beta}$  внешней  $G_1G_2G_3G_4$  и внутренней  $g_1g_2g_3g_4$  граней рассматриваемой УСП определяются значениями радиусов  $R$  и  $r$  внешнего и внутреннего шаровых слоев и углов  $\alpha$ ,  $\beta$ :

$$S_{R\alpha\beta} = 2\alpha R^2 \sin \frac{\beta}{2}; \quad S_{r\alpha\beta} = k^2 S_{R\alpha\beta}.$$

Площадь  $S_{spl}$  боковой поверхности рассматриваемой УСП является суммой площадей одинаковых круговых трапеций  $G_1g_1g_4G_4$  и  $G_2g_2g_3G_3$  и площадей двух одинаковых круговых трапеций  $G_1g_1g_2G_2$  и  $G_3g_3g_4G_4$ :

$$S_{spl} \approx 2S_{Rr\beta} + 2S_{Rr\alpha\beta} = \beta R^2 (1-k^2) + \alpha (1-k^2) R^2 \cos \frac{\beta}{2} = R^2 (1-k^2) \left( \beta + \alpha \cos \frac{\beta}{2} \right).$$

Суммарная площадь поверхности анализируемой УСП будет равна

$$S_{TSP} = S_{RH\alpha\beta} + S_{rh\alpha\beta} + S_{spl}. \quad (6)$$

Если все  $N_{V\Sigma}$  источников располагаются равномерно на внутренней, внешней и боковых поверхностях УСП, то поверхностная плотность такого размещения  $\rho_S = N_{V\Sigma}/S_{TSP}$  [ПУ/м<sup>2</sup>].

Плотности потока мощности ЭМП РЧ в точке наблюдения  $O$  от источников, распределенных по внешней  $G_1G_2G_3G_4$  и внутренней  $g_1g_2g_3g_4$  граням, будут соответственно равны  $Z_{\min}$  и  $Z_{\max}$ . Развертка боковой поверхности рассматриваемой УСП представляет собой  $(\alpha + \beta)/\pi$ -ю часть кольца с внешним  $R$  и внутренним  $r$  радиусами, что обеспечивает гиперболическое распределение вероятности степени « $-(1 + 2/v)$ » значений ППМ ЭМП РЧ от ПУ, распределенных по площади  $S_{spl}$  этой поверхности [6]. Таким образом, суммарная интенсивность  $Z_{\Sigma S}$  ЭМФ в ТН от излучающих ПУ, расположенных равномерно случайно по внутренней поверхности анализируемой УСП, запишется в виде:

$$Z_{\Sigma S} = S_{R\alpha\beta} \rho_S Z_{\min} + S_{r\alpha\beta} \rho_S Z_{\max} + S_{spl} \rho_S m_{1S}(Z); \quad (7)$$

$$m_{1S}(Z) = \frac{2Z_{\min}^{\frac{2}{v}} Z_{\max}^{\frac{2}{v}} \left( Z_{\max}^{1-\frac{2}{v}} - Z_{\min}^{1-\frac{2}{v}} \right)}{(v-2) \left( Z_{\max}^{\frac{2}{v}} - Z_{\min}^{\frac{2}{v}} \right)}, \quad v \neq 2; \quad m_{1S}(Z) = \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}}, \quad v = 2, \quad (8)$$

где  $m_{1S}(Z)$  – матожидание значений ППМ в ТН от ПУ, располагаемых случайно равномерно со средней плотностью  $\rho_S$  на боковых поверхностях анализируемой УСП.

3.  $N_{V\Sigma}$  источников располагаются случайно равномерно с плотностью  $\rho_L$  на внутренних, внешних и боковых ребрах анализируемой УСП. Плотности потока мощности ЭМП РЧ в точке наблюдения  $O$  от источников, распределенных по ребрам внешней  $G_1G_2G_3G_4$  и внутренней  $g_1g_2g_3g_4$  граней УСП, будут, как в пункте 2, равны  $Z_{\min}$  и  $Z_{\max}$ , а периметры этих граней  $L_{R\alpha\beta}$  и  $L_{r\alpha\beta}$  запишутся в виде:

$$L_{R\alpha\beta} = 2R \left( \beta + \alpha \cos \frac{\beta}{2} \right); \quad L_{r\alpha\beta} = kL_{R\alpha\beta}.$$

Суммарная длина боковых и всех ребер усеченной сферической пирамиды  $G_1G_2G_3G_4g_1g_2g_3g_4$  соответственно:

$$L_{Rrsp} = 4(R - r) = 4R(1 - k);$$

$$L_{\Sigma Rr\alpha\beta} = L_{R\alpha\beta} + L_{r\alpha\beta} + L_{Rrsp} = 2R(1 + k) \left( \beta + \alpha \cos \frac{\beta}{2} \right) + 4R(1 - k). \quad (9)$$

Если все  $N_{V\Sigma}$  источников располагаются равномерно на ребрах усеченной сферической пирамиды, то линейная плотность такого размещения  $\rho_L = N_{V\Sigma}/L_{\Sigma Rr\alpha\beta}$  [ПУ/м]. В силу идентичности и характера расположения боковых ребер УСП по отношению к ТН распределение вероятности значений ППМ ЭМП РЧ от ПУ, распределенных по этим ребрам, будет гиперболическим степени « $-(1 + 1/\nu)$ » [6]. Таким образом, для представляющей практический интерес области значений  $\nu > 1,5$  суммарная интенсивность  $Z_{\Sigma L}$  ЭМФ в ТН от излучающих ПУ, расположенных равномерно случайно по ребрам УСП, запишется в виде:

$$Z_{\Sigma L} = L_{R\alpha\beta}\rho_L Z_{\min} + L_{r\alpha\beta}\rho_L Z_{\max} + L_{Rrsp}\rho_L m_{1L}(Z); \quad (10)$$

$$m_{1L}(Z) = \frac{Z_{\min}^{\frac{1}{\nu}} Z_{\max}^{\frac{1}{\nu}}}{(\nu - 1) \left( Z_{\max}^{\frac{1}{\nu}} - Z_{\min}^{\frac{1}{\nu}} \right)} \left( Z_{\max}^{1-\frac{1}{\nu}} - Z_{\min}^{1-\frac{1}{\nu}} \right), \quad \nu > 1, \quad (11)$$

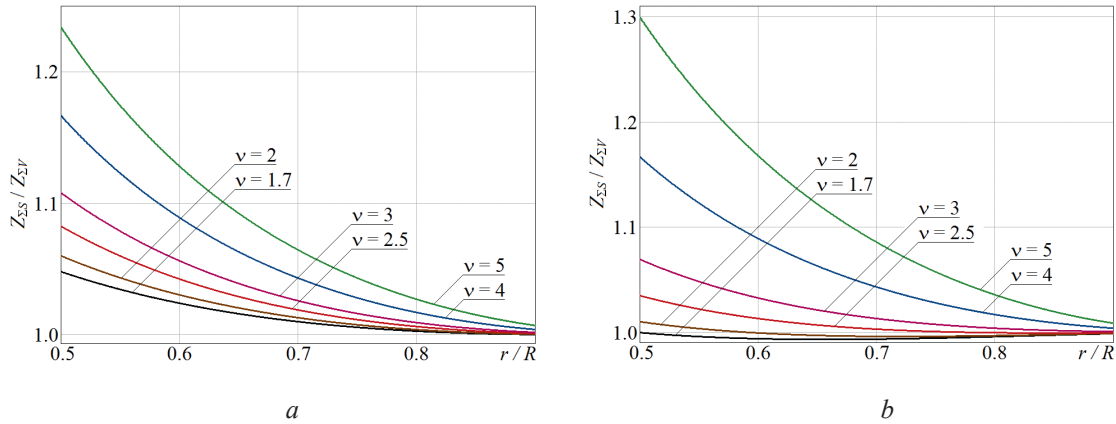
где  $m_{1L}(Z)$  – матожидание значений ППМ в ТН от ПУ, располагаемых случайно равномерно со средней плотностью  $\rho_L$  на ребрах УСП.

4. Внутренний объем УСП разделен на  $n^3$  секций равной длины  $\Delta R = (R - r)/n$  и равных угловых размеров  $\alpha/n$  и  $\beta/n$ . Выполняется сравнение средней интенсивности ЭМФ в ТН от  $N_{V\Sigma}$  излучающих ПУ, расположенных равномерно случайно по всему объему УСП, со средней интенсивностью ЭМФ в ТН в ситуациях, когда эти источники ЭМП РЧ располагаются случайно равномерно на всех гранях секций анализируемой УСП и когда они распределены случайно равномерно по ребрам всех секций анализируемой УСП.

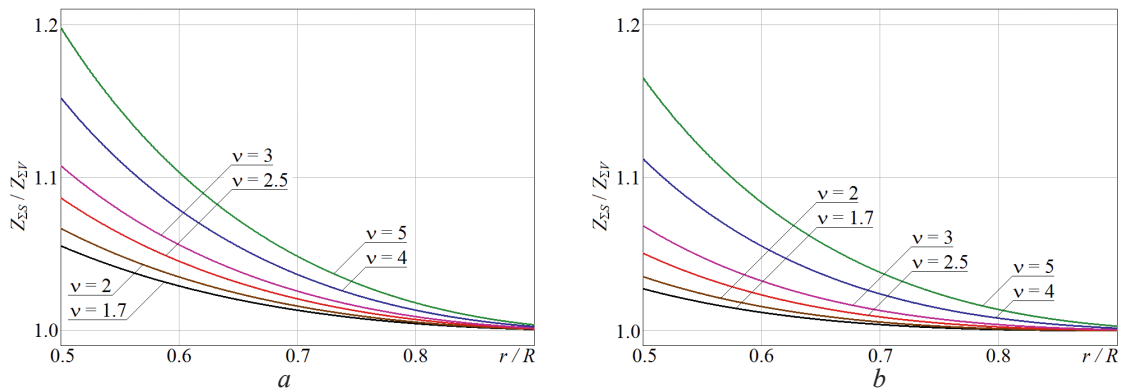
### Результаты анализа и их обсуждение

На рис. 3, *a, b* приведены расчетные зависимости отношения  $Z_{\Sigma S} / Z_{\Sigma V}$  средней интенсивности ЭМФ в ТН для случаев, когда источники распределены равномерно по стенкам и объему усеченной сферической пирамиды, от параметра  $k = r/R$ , характеризующего относительную длину анализируемого пространства в направлении на ТН. Расчеты выполнены с использованием соотношений (4), (5), (7) и (8) для различных условий РРВ для относительно узкого (рис. 3, *a*:  $\alpha = \beta = \pi/18$ ) и достаточно широкого телесного угла  $\Omega_0$  (рис. 3, *b*:  $\alpha = \beta = \pi/3$ ). На рис. 4, *a, b* представлены аналогичные расчетные зависимости отношения  $Z_{\Sigma S} / Z_{\Sigma V}$  от  $k = r/R$  для случая, когда внутреннее пространство УСП разделено на 64 секции ( $n = 4$ ).

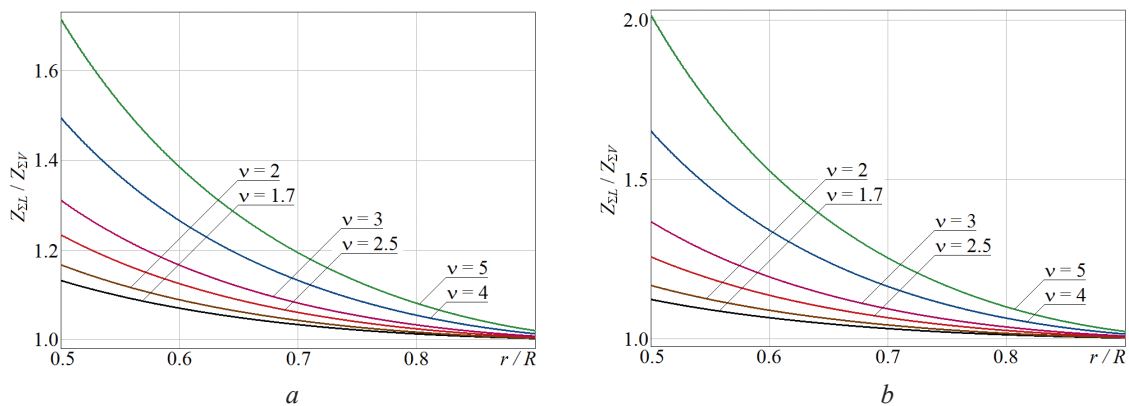
Расчетные зависимости отношения  $Z_{\Sigma L} / Z_{\Sigma V}$  средней интенсивности ЭМФ в ТН для случаев, когда источники распределены равномерно по ребрам и объему усеченной сферической пирамиды, от параметра  $k = r/R$  приведены на рис. 5, *a, b*. Для сопоставления со случаем их распределения по граням УСП расчеты с использованием (4), (5), (10), (11) также выполнены для различных  $\nu$ , для  $\alpha = \beta = \pi/18$  (рис. 5, *a*) и  $\alpha = \beta = \pi/3$  (рис. 5, *b*). На рис. 6, *a, b* представлены аналогичные расчетные зависимости отношения  $Z_{\Sigma L} / Z_{\Sigma V}$  от  $k = r/R$  для случая, когда внутреннее пространство УСП разделено на 64 секции ( $n = 4$ ).



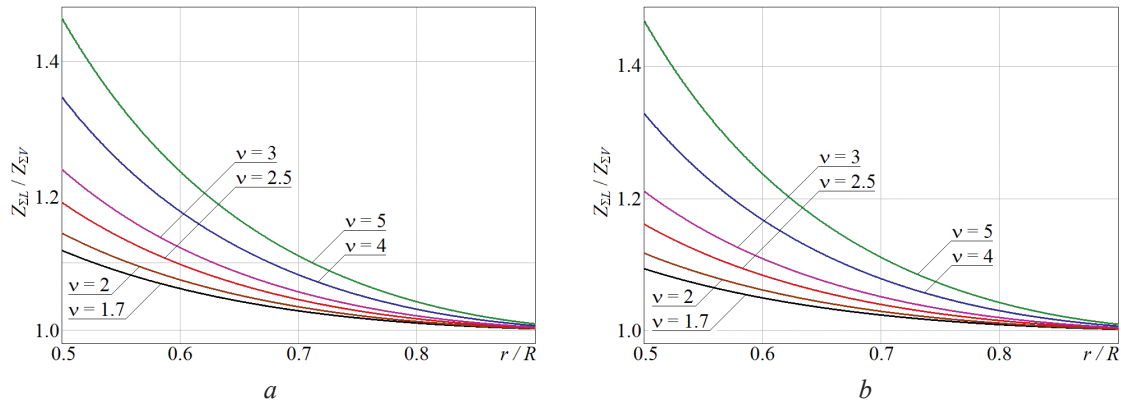
**Рис. 3.** Зависимости отношения суммарной интенсивности электромагнитного фона в точке наблюдения для случаев, когда источники распределены по поверхностям граней и по объему усеченной сферической пирамиды, от  $k = r/R$  при  $n = 1$ :  $a$  – при  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ;  $b$  – при  $\alpha = \beta = 60^\circ$   
**Fig. 3.** Dependences of the ratio of the total electromagnetic background intensity in the observation point for the cases when sources are distributed over the surfaces of the faces and the volume of the truncated spherical pyramid, on  $k = r/R$  at  $n = 1$ :  $a$  – at  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ;  $b$  – at  $\alpha = \beta = 60^\circ$



**Рис. 4.** Зависимости отношения суммарной интенсивности электромагнитного фона в точке наблюдения для случаев, когда источники распределены по поверхностям граней 64 секций ( $n = 4$ ) усеченной сферической пирамиды и по ее объему, от  $k = r/R$ :  $a$  – при  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ;  $b$  – при  $\alpha = \beta = 60^\circ$   
**Fig. 4.** Dependences of the ratio of the total intensity electromagnetic background in the observation point for the cases when sources are distributed over the surfaces of the faces of 64 sections ( $n = 4$ ) of a truncated spherical pyramid and over its volume, on  $k = r/R$ :  $a$  – at  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ;  $b$  – at  $\alpha = \beta = 60^\circ$



**Рис. 5.** Зависимости отношения суммарной интенсивности электромагнитного фона в точке наблюдения для случаев, когда источники распределены по ребрам и по объему усеченной сферической пирамиды, от  $k = r/R$  при  $n = 1$ :  $a$  – при  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ;  $b$  – при  $\alpha = \beta = 60^\circ$   
**Fig. 5.** Dependences of the ratio of the total intensity electromagnetic background in the observation point for the cases when the sources are distributed along the edges and volume of a truncated spherical pyramid, on  $k = r/R$  at  $n = 1$ :  $a$  – at  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ;  $b$  – at  $\alpha = \beta = 60^\circ$



**Рис. 6.** Зависимости отношения суммарной интенсивности электромагнитного фона в точке наблюдения для случаев, когда источники распределены по ребрам 64 секций усеченной сферической пирамиды ( $n = 4$ ) и по ее объему, от  $k = r/R$ :  $a$  – при  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ;  $b$  – при  $\alpha = \beta = 60^\circ$

**Fig. 6.** Dependences of the ratio of the total intensity electromagnetic background in the observation point for the cases when sources are distributed over the surfaces of 64 sections ( $n = 4$ ) of a truncated spherical pyramid and over its volume, on  $k = r/R$ :  $a$  – at  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ;  $b$  – at  $\alpha = \beta = 60^\circ$

Анализируя приведенные расчетные зависимости, можно отметить, на что необходимо обратить внимание.

1. Следует ожидать, что по сравнению с однородным распределением ПУ-источников ЭМП РЧ по внутреннему пространству зданий их неоднородное по объему равномерное размещение на внутренних поверхностях зданий либо на стыках этих поверхностей, как правило, обеспечивает увеличение средней интенсивности электромагнитного фона в точках наблюдения внутри здания:

- до 0,8–1,2 дБ ( $\nu = 4$ –5) при поверхностном распределении и до 2–3 дБ при линейном размещении периферийных устройств на стыках внутренних поверхностей;
- до 0,2–0,3 дБ ( $\nu = 1,7$ –2,5) при поверхностном распределении и до 0,8–1,0 дБ при линейном размещении периферийных устройств на стыках внутренних поверхностей.

2. Описанное в п. 1 ожидаемое увеличение средней интенсивности ЭМФ сравнительно слабо зависит от ширины телесного угла  $\Omega_0$ , но существенно зависит от относительной длины анализируемой части пространства (параметра  $k$ ), в котором размещаются ПУ, и от условий РРВ. При росте  $k$  до 0,7–0,8 (сокращении относительной длины УСП в направлении на ТН до 20–30 %) влияние рассмотренных видов неоднородности распределения ПУ по внутреннему пространству здания на среднюю интенсивность электромагнитного фона, создаваемого ими в ТН, резко ослабевает и становится пренебрежимо малым: ожидаемый рост средней интенсивности ЭМФ не превышает 0,25–0,35 дБ при распределении ПУ по внутренним поверхностям зданий и 0,80–1,20 дБ для линейного размещения ПУ на стыках внутренних поверхностей даже при  $\nu = 4$ –5.

3. Увеличение средней интенсивности ЭМФ в ТН внутри здания, как при размещении ПУ на внутренних поверхностях зданий, так и при их размещении на стыках этих поверхностей, по сравнению с их объемным распределением по внутреннему пространству УСП существенно зависит от условий РРВ, и тем значительнее, чем больше значение параметра  $\nu$  в модели РРВ (1), (2). Однако влияние данного обстоятельства на суммарный уровень ЭМФ в здании существенно ослаблено в силу того, что, как правило, чем выше значение  $\nu$  для источников ЭМП РЧ некоторой области внутреннего пространства здания, тем больше удаленность этой области от ТН и меньше вклад источников этой области в уровень ЭМФ в ТН. Это подтверждается результатами [1, 2] для модели РРВ [5] и равномерного объемного распределения источников, свидетельствующими о том, что если вклад в суммарную интенсивность ЭМФ области внутреннего пространства с параметрами  $k = 0,5$ ,  $\nu = 3$  составляет  $\approx 37\%$ , то вклад области с  $k = 2/3$  и  $\nu = 6$  – всего  $\approx 8\%$ , а вклад области с  $k \ll 1$  и  $\nu = 12$  – менее 1 %.

4. Следует принимать во внимание, что переход от модели равномерного распределения ПУ по внутреннему пространству здания к моделям их неоднородного распределения по внутренним поверхностям помещений либо по линиям их стыков должен сопровождаться соответствующим учетом изменения вклада в уровень ЭМФ источников «ближней зоны» радиуса  $r$  (части пространства помещения, в котором располагается точка наблюдения). Результаты, приведенные в [1, 2], позволяют сделать вывод, что если совокупность ПУ-источников ЭМП РЧ в окрестности ТН располагается не по всему объему ближней зоны, а вблизи ее границы, то их вклад в уровень



ЭМФ уменьшается до трех раз, что практически полностью компенсирует полученное выше увеличение вклада излучений ПУ за пределами «ближней зоны» при их неоднородном по отношению к внутреннему объему здания распределении по внутренним поверхностям либо по линиям их стыков (пересечений).

### Заключение

1. По сравнению с равномерным распределением периферийных устройств – источников радиочастотных электромагнитных полей по внутреннему пространству зданий их равномерное размещение на внутренних поверхностях зданий либо равномерное линейное распределение вдоль стыков этих поверхностей, как правило, вызывает некоторое увеличение средней интенсивности электромагнитного фона, создаваемого источниками «дальней зоны» в точке наблюдения внутри здания, причем при линейном распределении источников увеличение интенсивности электромагнитного фона примерно в 1,5 раза (на  $\approx 1,8$  дБ) больше, чем при их распределении по поверхностям. Данное увеличение относительно мало зависит от ширины анализируемого телесного угла, но существенно – от относительной длины  $k = r/R$  анализируемой части пространства в направлении на точку наблюдения и от условий распространения радиоволн (параметра  $v$ ).

2. При относительно малых  $k$  и больших  $v$  увеличение интенсивности электромагнитного фона может достигать 3–5 дБ, однако для представляющих наибольший практический интерес значений  $k \geq 0,5$  и  $v \leq 5$  переход от однородного объемного распределения источников к их поверхностному либо линейному распределению обеспечивает рост вклада радиочастотных электромагнитных полей источников «дальней зоны» в суммарную интенсивность электромагнитного фона в точке наблюдения не более 2–3 дБ. Поскольку изменение характера распределения источников «ближней зоны» (помещения, в котором расположена точка наблюдения) вызывает уменьшение вклада их радиочастотных электромагнитных полей в суммарную интенсивность электромагнитного фона до 4–5 дБ [1, 2], указанные изменения вкладов источников «дальней» и «ближней» зон практически взаимно компенсируются, и переход от однородного равномерного к рассмотренным типам неоднородного распределения источников по внутреннему пространству здания практически не влияет на интегральные оценки создаваемого ими электромагнитного фона внутри здания.

### References

1. Mordachev V. I. (2021) Characteristics of the Electromagnetic Environment Created by Radiations of User Equipment of ...4G/5G/6G Cellular (Mobile) Communications in Buildings. *Doklady BGUIR*. 19 (6), 42–50. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-42-50> (in Russian).
2. Mordachev V. (2022) System Analysis of Electromagnetic Environment Created by Radiating 4G/5G User Equipment Inside Buildings. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2022"*, Sweden, Sept. 5–8. 525–530. DOI: 10.1109/EMCEurope51680.2022.9900959.
3. Recommendation ITU-R P.1238-10. *Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Indoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 450 GHz*. 2019. 28.
4. Rappaport T. S. (2002) *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2<sup>nd</sup> ed. Prentice Hall. 710.
5. Akerberg D. (1988) Properties of a TDMA Pico Cellular Office Communication System. *IEEE Globecom*. 1343–1349.
6. Mordachev V. I. (2009) *System Ecology of Cellular Communications*. Minsk, BSU Publ. 319 (in Russian).

### Сведения об авторе

**Мордачев В. И.**, к. т. н., доцент, ведущий научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-84-38  
E-mail: [mordachev@bsuir.by](mailto:mordachev@bsuir.by)  
Мордачев Владимир Иванович

### Information about the author

**Mordachev V. I.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Leading Researcher of the 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](mailto:mordachev@bsuir.by)  
Mordachev Vladimir Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-58-67>

*Original paper*

UDC 681.51

## DUAL STABILIZATION OF THE MULTIDIMENSIONAL REGRESSION OBJECT AT THE GIVEN LEVEL

VLADIMIR S. MUKHA, NANCY F. KAKO

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

*Submitted 09.12.2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023

**Abstract.** The statement of the problem of the dual control of the regression object with multidimensional-matrix input and output variables and dynamic programming functional equations for its solution are given. The problem of the dual stabilization of the regression object at the given level is considered. The purpose of control is reaching the given value of the output variable by sequential control actions in production operation mode. In order to solve the problem, the regression function of the object is supposed to be affine in input variables, and the inner noise is supposed to be Gaussian. The sequential solution of the functional dynamic programming equations is performed. As a result, the optimal control action at the last control step is obtained. It is shown also that the obtaining of the optimal control actions at the other control steps is connected with big difficulties and impossible both analytically and numerically. The control action obtained at the last control step is proposed to be used at the arbitrary control step. This control action is called the control action with passive information accumulation. The dual control algorithm with passive information accumulation was programmed for numerical calculations and tested for a number of objects. It showed acceptable results for the practice. The advantages of the developed algorithm are theoretical and algorithmical generality.

**Keywords:** dual control, multidimensional-matrix regression object, dynamic programming, passive information accumulation.

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

**For citation.** Mukha V. S., Kako N. F. (2023) Dual Stabilization of the Multidimensional Regression Object at the Given Level. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 58–67. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-58-67>.

## ДУАЛЬНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ МНОГОМЕРНОГО РЕГРЕССИОННОГО ОБЪЕКТА НА ЗАДАННОМ УРОВНЕ

В. С. МУХА, Н. Ф. КАКО

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

*Поступила в редакцию 09.12.2022*

**Аннотация.** Приводятся постановка задачи дуального управления регрессионным объектом с многомерно-матричными входной и выходной переменными и функциональные уравнения динамического программирования для ее решения. Рассматривается задача дуальной стабилизации объекта на заданном уровне. Целью управления является вывод выходной переменной объекта на требуемый уровень и поддержание ее на этом уровне с помощью последовательных управляющих воздействий в режиме нормальной эксплуатации. Для решения задачи функция регрессии объекта аппроксимируется аффинной по входному воздействию функцией, а внутренний шум объекта предполагается аддитивным Гауссовским. Выполнено последовательное решение функциональных уравнений динамического программирования, в результате

чего получено управляющее воздействие на последнем шаге управления. Показано, что отыскание управляющего воздействия на других шагах управления связано с большими трудностями и невыполнимо как аналитически, так и численно. Управляющее воздействие, полученное на последнем шаге, предлагается использовать на любом шаге управления. Такой алгоритм назван алгоритмом дуального управления с пассивным накоплением информации. Этот алгоритм запрограммирован для численных расчетов, апробирован на ряде объектов и показал приемлемые для практики результаты. Важным достоинством алгоритма является его теоретическая и алгоритмическая общность.

**Ключевые слова:** дуальное управление, многомерно-матричный регрессионный объект, динамическое программирование, пассивное накопление информации.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Муха, В. С. Дуальная стабилизация многомерного регрессионного объекта на заданном уровне / В. С. Муха, Н. Ф. Како // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 2. С. 58–67. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-58-67>.

## Introduction

The problem of the dual control of the multidimensional regression object is formulated as follows [1–5]. The control system with controlled object O, controller C, feedback path and driving action  $g_s$  is considered (Fig. 1).

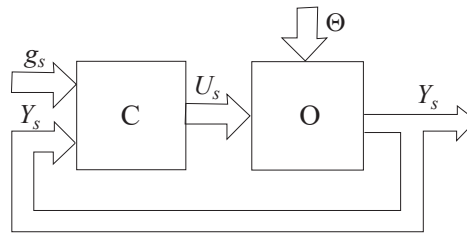


Fig. 1. To the statement of the dual control problem

The controlled object O is described at the instant of time  $s$  by the probability density function

$$f_{Y_s}(y_s, \Theta, U_s), \quad s = 0, 1, 2, \dots, n,$$

where  $Y_s = (Y_{i_1, i_2, \dots, i_p, s})$  is the  $p$ -dimensional matrix of the output of the object at the instant of time  $s$ ;  $U_s = (U_{i_1, i_2, \dots, i_q, s})$  is the  $q$ -dimensional matrix of the input of the object at the instant of time  $s$  (control action);  $\Theta = \{\Theta_1, \dots, \Theta_m\}$  is a set of the parameters of the controlled object consisting of the random multidimensional matrices  $\Theta_1, \dots, \Theta_m$  with known priory joint probability density function  $f_{\Theta, 0}(\theta)$ .

We will call the set  $\Theta = \{\Theta_1, \dots, \Theta_m\}$  a generalized parameter of the object O. It is supposed, that the generalized parameter  $\Theta$  takes constant value for all of the instants of time  $s = 0, 1, \dots, n$ . The driving action  $g_s$  is supposed to be known deterministic multidimensional-matrix sequence.

The quality of the functioning of the system at each instant of time  $s$  is estimated by a specific loss function  $W_s(Y_s, g_s)$ , depending of output  $Y_s$  and, might, driving action  $g_s$ . A system, for which the total for  $n + 1$  instants of time total average risk

$$R = E \left\{ \sum_{s=0}^n W_s(Y_s, g_s) \right\} = \sum_{s=0}^n R_s, \quad R_s = E(W_s(Y_s, g_s)), \quad (1)$$

is minimal, is called optimal system.

There  $E(\cdot)$  means the mathematical expectation,  $R_s = E(W_s(Y_s, g_s))$  is a specific risk. The control action  $U_s$  belongs to some permissible area. The controller C uses all of the past information in the form of observations  $\vec{u}_{s-1} = (u_0, u_1, \dots, u_{s-1})$ ,  $\vec{y}_{s-1} = (y_0, y_1, \dots, y_{s-1})$  of the input and output values of the object to determine the control action  $u_s$  at the instant of time  $s$ .

The task consists of determining the strategies of the controller C, i. e. sequence of the conditional probability density functions  $f_{U_s}(u_s / \vec{u}_{s-1}, \vec{y}_{s-1})$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$ , for which the total average risk  $R$  (1) is minimal.

As it is known [2–5], the optimal strategies of the controller C are not randomized, i. e. the control actions  $U_s$  are not random and will be denoted  $u_s$ . In this conditions the controller C will be described by conditional probability density function  $f_{y_s}(y_s / \theta, u_s)$ , where  $u_s$  is the fixed value of the variable  $U_s$ . We will use the following simplified notation:  $f_{\Theta,0}(\theta) = f_0(\theta)$ ,  $f_{y_s}(y_s / \theta, u_s) = f(y_s / \theta, u_s)$ .

The optimal control algorithm, i. e. the sequence of the control actions  $u_n, u_{n-1}, \dots, u_0$  is determined in pointed inverse order from the following functional equations:

$$f_n^*(\bar{u}_{n-1}, u_n^*, \bar{y}_{n-1}) = \min_{u_n \in \mathbb{U}} \varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}); \quad (2)$$

$$f_{n-m}^*(\bar{u}_{n-m-1}, u_{n-m}^*, \bar{y}_{n-m-1}) =$$

$$= \min_{u_{n-m} \in \mathbb{U}} \left[ \varphi_{n-m}(\bar{u}_{n-m}, \bar{y}_{n-m-1}) + \int_{\Omega(y_{n-m})} f_{n-m+1}^*(\bar{u}_{n-m}, u_{n-m+1}^*, \bar{y}_{n-m}) f(y_{n-m} / \bar{u}_{n-m}, \bar{y}_{n-m-1}) d\Omega \right], \quad (3)$$

$$m = 1, 2, \dots, n,$$

where  $\varphi_s$  is determined by expression

$$\varphi_s(\bar{u}_s, \bar{y}_{s-1}) = \int_{\Omega(\bar{y}_s)} W_s(y_s, g_s) f(y_s / \bar{u}_s, \bar{y}_{s-1}) d\Omega, \quad s = 0, \dots, n, \quad (4)$$

in which

$$f(y_s / \bar{u}_s, \bar{y}_{s-1}) = \int_{\Omega(\theta)} f(y_s / \theta, u_s) f_s(\theta) d\Omega; \quad (5)$$

$$f_s(\theta) = \frac{f_0(\theta) \prod_{v=0}^{s-1} f(y_v / \theta, u_v)}{\int_{\Omega(\theta)} f_0(\theta) \prod_{v=0}^{s-1} f(y_v / \theta, u_v) d\Omega}, \quad (6)$$

and  $u_{n-m+1}^*$  is optimal control action for the instant of time  $(n-m+1)$ .

Note. The notation  $\min_{u_n \in \mathbb{U}} \varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})$  means the following:

$$\min_{u_n \in \mathbb{U}} \varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = \varphi_n(u_n^*, \bar{u}_{n-1}, \bar{y}_{n-1}).$$

### Stabilization of the object at the given level

We will consider the task of reaching the required value of the regression function by sequential control actions in production operation mode and stabilization of the regression function at this level. The task is formulated in this case as follows.

The controlled object is described at the  $s$ -th instant of time by Gaussian probability density function

$$f_{y_s}(y_s / C, u_s) = N(\psi(C, u_s), d_y), \quad (7)$$

where  $\psi(C, u_s)$  is a regression function;  $d_y$  is a variance-covariance matrix of the inner noise;  $u_s$  is a  $q$ -dimensional matrix;  $y_s$  is a  $p$ -dimensional matrix;  $C$  is a generalized parameter of the object.

Note, that we denote now the generalized parameter  $C$  instead of  $\theta$  in expressions (5), (6). Let us approximate the regression function by affine function:

$$y = \psi(C) = C_0 + {}^{0,q}C_1 u = C_{t,0} + {}^{0,q}C_1 u = \psi(C_t), \quad (8)$$

or

$$y = \psi(C) = \sum_{i=0}^m {}^{0,iq}C_i u^i = \sum_{i=0}^m {}^{0,iq}C_i u^i = \psi(C_t), \quad m = 1,$$

where  $C_k$ ,  $k = \overline{0, m}$ , are  $kq$ -dimensional random matrices  $C_{t,k} = (C_k)^{B_{p+kq,kq}}$ ;  $C_k = (C_{t,k})^{H_{p+kq,kq}}$ , and  $H_{p+kq,kq}$ ,  $B_{p+kq,kq}$  are the transpose substitutions of the type “back” and “onward” respectively (in the article, the multidimensional-matrix notation is used [6]).

Let us combine the matrices  $C_k$  into a one-dimensional cell  $C = \{C_k\}$ ,  $k = 0, 1$ . Provided the regression function (8), the probability density function of the object (7) take the following form:

$$f(y_n / c_t, u_n) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_Y} |d_Y|}} \exp \left( -\frac{1}{2} \left( d_Y^{-1} \left( y_n - \sum_{i=0}^m {}^{0,iq} (u_n^i c_{t,i}) \right) \right)^2 \right), \quad (9)$$

where  $k_Y$  is the number of the elements of the matrix  $y_n$ .

For the task of the object stabilization at the level  $g$  we choose the loss function in the form of  $W(Y_s) = \|Y_s - g\|^2$ , where  $\|\cdot\|$  is the Euclidean norm of a multidimensional matrix.

Let the random cell  $C_t = \{C_{t,k}\}$ ,  $k = \overline{0, m}$ , has the Gaussian priory probability density function described by the following expression [7]:

$$\begin{aligned} f(c_t) &= M_{\Xi} \exp \left( -\frac{1}{2} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m {}^{0,q_j} \left( (c_{t,i} - v_{c_{t,i}}) d_{c_t}^{i,j} (\xi_j - v_{c_{t,j}}) \right) \right) = \\ &= M_{c_t} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m {}^{0,q_j} \left( {}^{0,q_i} (c_{t,i} d_{c_t}^{i,j}) c_{t,j} \right) + \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m {}^{0,q_j} \left( {}^{0,q_i} (c_{t,i} d_{c_t}^{i,j}) v_{c_{t,j}} \right) - \right. \\ &\left. - \frac{1}{2} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m {}^{0,q_j} \left( {}^{0,q_i} (v_{c_{t,i}} d_{c_t}^{i,j}) v_{c_{t,j}} \right) \right\}, \quad M_{c_t} = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{n_c} |d_{c_t}|}}, \quad q_i = p + iq, \quad i = \overline{0, m}, \end{aligned}$$

where the two-dimensional cell  $d_{c_t} = \{d_{c_{t,i,j}}\}$  ( $i, j = \overline{0, m}$ ) is the variance-covariance cell of the random cell  $C_t$  [7];  $d_{c_{t,i,j}} = E \left( {}^{0,0} \left( (C_{t,i} - v_{c_{t,i}})(C_{t,j} - v_{c_{t,j}}) \right) \right)$  is the  $((iq + p) + (jq + p))$ -dimensional matrix;  $d_{c_t}^{-1} = \{d_{c_t}^{i,j}\}$  ( $i, j = \overline{0, m}$ ) is the cell inverse to the cell  $d_{c_t}$ ;  $v_{c_t} = \{v_{c_{t,0}}, v_{c_{t,1}}, \dots, v_{c_{t,m}}\} = \{v_{c_{t,i}}\}$  ( $i, j = \overline{0, m}$ ) is the one-dimensional cell of the mathematical expectation of the random cell  $C_t$ ; ( $v_{c_{t,i}} = E(C_{t,i})$  is the  $(iq + p)$ -dimensional matrix);  $n_c$  is the number of the scalar elements of the cell  $c_t$ .

The calculation of the control actions  $u_n, u_{n-1}, \dots, u_0$  is connected with the formulae (2)–(6).

1. The posterior probability density function  $f_n(c)$  (6) is defined by the expression [7]:

$$f(c_t / \bar{y}_{n-1}, \bar{u}_{n-1}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{n_y} |D_{c_t}|}} \exp \left( -\frac{1}{2} {}^{0,2} \left\{ D_{c_t}^{-1} {}^{0,0} \left\{ c_t - N_{c_t} \right\}^2 \right\} \right) = f_n(c_t), \quad (10)$$

in which  $D_{c_t} = \{D_{c_{t,i,j}}\}$ ,

$$D_{c_t}^{-1} = \{D_{c_t}^{i,j}\} = \{d_{c_t}^{i,j} + S_{i,j}\} = \left\{ d_{c_t}^{i,j} + \left( {}^{0,0} (d_Y^{-1} S_{u_i u_j}) \right)^{T_{i,j}} \right\}, \quad i, j = \overline{0, m}; \quad (11)$$

$$B = \{B_i\} = \left\{ \sum_{j=0}^m {}^{0,jq+p} \left( d_{c_t}^{i,j} v_{c_{t,j}} \right) + {}^{0,p} \left( d_{c_t}^{-1} S_{y u^i} \right)^{T_i} \right\}, \quad i = \overline{0, m}; \quad (12)$$

$$N_{c_t} = \{N_{c_{t,i}}\} = {}^{0,1} \{D_{c_t} B\} = \left\{ \sum_{j=0}^m {}^{0,p+jq} \left( D_{c_{t,i,j}} B_j \right) \right\}, \quad i = \overline{0, m}; \quad (13)$$

$$S_{u^k u^\lambda} = \sum_{\mu=1}^{n-1} {}^{0,0} (u_\mu^k u_\mu^\lambda); \quad S_{y u^\lambda} = \sum_{\mu=1}^{n-1} {}^{0,0} (y_\mu u_\mu^\lambda); \quad (14)$$

$$\bar{y}_{n-1} = (y_1, y_2, \dots, y_{n-1}); \quad \bar{u}_{n-1} = (u_1, u_2, \dots, u_{n-1}); \quad \bar{u}_{n-1} = (u_1, u_2, \dots, u_{n-1}).$$

The substitutions of transpose  $T_{i,j}$  in (11) and  $T_i$  in (12) have the following forms:

$$T_{i,j} = \left( \begin{array}{c} \bar{i}_1, \bar{i}_2, \dots, \bar{i}_i, \bar{\lambda}, \bar{J}_1, \bar{J}_2, \dots, \bar{J}_j, \bar{\mu} \\ \bar{\lambda}, \bar{\mu}, \bar{i}_1, \bar{i}_2, \dots, \bar{i}_i, \bar{J}_1, \bar{J}_2, \dots, \bar{J}_j \end{array} \right), \quad i, j = \overline{0, m}; \quad T_i = \left( \begin{array}{c} \bar{i}_1, \bar{i}_2, \dots, \bar{i}_i, \bar{\mu} \\ \bar{\mu}, \bar{i}_1, \bar{i}_2, \dots, \bar{i}_i \end{array} \right), \quad i = \overline{0, m},$$

where the multi-indexes  $\bar{J}_1, \bar{J}_2, \dots, \bar{J}_j, \bar{i}_1, \bar{i}_2, \dots, \bar{i}_i$  contain by  $q$  indexes and the multi-indexes  $\bar{\lambda}, \bar{\mu}$  contain by  $p$  indexes.

There are no multi-indexes  $\bar{\lambda}, \bar{\mu}$  in these substitutions in the case of  $p = 0$ , and substitutions  $T_{i,j}, T_i$  in this case are identical [6].

The two-dimensional cell  $D_{c_i}^{-1} = \{D_{c_i}^{i,j}\}, i, j = \overline{0, m}$ , (11) has the same dimension as the two-dimensional cell  $D_{c_i} = \{D_{c_i,i,j}\}$ , i. e.  $D_{c_i}^{i,j}$  is the  $((iq + p) + (jq + p))$ -dimensional matrix. The element  $B_i$  of the one-dimensional cell  $B = \{B_i\}, i = \overline{0, m}$ , (12) is the  $(iq + p)$ -dimensional matrix.

It is of interest in dual control to use the single measurements for updating the estimations (10)–(14). We will have for this the expressions  $S_{u_s^k u_s^\lambda} = {}^{0,0}(u_s^{k+\lambda}), S_{y_s u_s^\lambda} = {}^{0,0}(y_s u_s^\lambda)$ , determined by single measurement  $(u_s, y_s)$ , instead of the expressions (14).

2. Let us find the probability density function  $f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})$  by the formula (5)

$$f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = \int_{\Omega(C)} f(y_n / c_i, u_n) f_n(c_i) d\Omega, \quad (15)$$

where  $f_n(c_i)$  is determined by the formula (10).

We will use for this the following theorem from [7].

*Theorem (total probability formula for the joint Gaussian distribution of the multidimensional random matrices).* Let  $\Xi = \{\Xi_i\}, i = 1, 2, \dots, m'$ , be an one-dimensional random cell, composed of the  $q_i$ -dimensional matrices  $\Xi_i, k_i$  the number of the scalar components of the matrix  $\Xi_i, f(\xi)$  the probability density function of the cell  $\Xi, k_\Xi = k_1 + k_2 + \dots + k_{m'}$  the number of the scalar components of the cell  $\Xi, f(y / \xi)$  the condition probability density function of a  $p$ -dimensional matrix  $Y, k_Y$  the number of the scalar components of the matrix  $Y, E^{k_\Xi}$  the  $k_\Xi$ -dimensional Euclidean space. If in the total probability formula

$$f(y) = \int_{E^{k_\Xi}} f(y / \xi) f(\xi) d\xi \quad (16)$$

the conditional probability density function  $f(y / \xi)$  has the following form

$$f(y / \xi) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_Y} |d_Y|}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left( d_Y^{-1} \left( y - \sum_{i=1}^{m'} {}^{0,q_i}(h_i \xi_i) \right)^2 \right)\right), \quad (17)$$

where  $h_i$  is a  $(p + q_i)$ -dimensional matrix, allowing the multiplication  ${}^{0,q_i}(h_i \xi_i)$ , and the probability density function  $f(\xi)$  has the following form

$$f(\xi) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_\Xi} |d_\Xi|}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m'} \sum_{j=1}^{m'} {}^{0,q_j} \left( ({}^{0,q_i}((\xi_i - v_{\Xi_i}) d_{\Xi_i}^{i,j})(\xi_j - v_{\Xi_j})) \right)\right\}$$

then the integral (16) (the total probability formula) is defined by the following expression:

$$f(y) = \int_{E^{k_\Xi}} f(y / \xi) f(\xi) d\xi = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_Y} |D_Y|}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left( D_Y^{-1} \left( y - \sum_{i=1}^{m'} {}^{0,q_i}(h_i v_{\Xi_i}) \right)^2 \right)\right), \quad (18)$$

where  $D_Y = d_Y + \sum_{i=1}^{m'} \sum_{j=1}^{m'} {}^{0,q_j} \left( ({}^{0,q_i}(h_i d_{\Xi_i,i,j}) h_j) \right)$ .

Let us replace  $\xi$  by  $c_i$  and  $f(\xi)$  by  $f_n(c_i)$  (10) in this theorem and compare the expression (9) with the expression (17) from theorem. We realize that  $p_i = iq, h_i = u_n^i$ . In accordance with formula (18) of the theorem we obtain the following expression for the integral (15):

$$f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = \int_{E^{k_C}} f(y_n / c_i, u_n) f_n(c_i) dc_i = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_Y} |D_Y|}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left( D_Y^{-1} (y_n - N_Y)^2 \right)\right), \quad (19)$$

where

$$D_Y = d_Y + \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m {}^{0,jq} \left( u_n^i D_{c_i,i,j} \right) u_n^j; \quad (20)$$

$$N_Y = \sum_{i=0}^m {}^{0,iq} \left( u_n^i N_{c_i,i} \right). \quad (21)$$

The matrices  $D_{c_i,i,j}$  and  $N_{c_i,i}$  in (20), (21) are defined by the expressions (11), (13).

The further calculations are connected with formula (4) of the functional equations. When the loss function is  $W(Y_s) = \|Y_s - g\|^2$ , then we need to calculate the integral

$$\varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = \int_{E^{n_y}} \|y_n - g\|^2 f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) dy_n,$$

with weight function  $f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})$  (19). In accordance with the theorem from Appendix 1 we get:

$$\varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = E(\|Y_n - g\|^2) = \int_{E^{n_y}} \|y_n - g\|^2 f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) dy_n = \text{tr}(D_Y + (N_Y - g)^2),$$

where  $D_Y$  and  $N_Y$  are determined by the formulae (20), (21). The variables  $D_Y$  and  $N_Y$  in this function  $\varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})$  depend on  $u_n$ . These dependencies for our affine regression function have the following forms:

$$\begin{aligned} D_Y &= d_Y + \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 {}^{0,jq} \left( u_n^i D_{c_i,i,j} \right) u_n^j = d_Y + \sum_{j=0}^1 \left( {}^{0,jq} \left( u_n^0 D_{c_0,0,j} \right) u_n^j + {}^{0,jq} \left( u_n^1 D_{c_1,1,j} \right) u_n^j \right) = \\ &= d_Y + \sum_{j=0}^1 \left( D_{c_0,0,j} u_n^j + {}^{0,jq} \left( u_n^1 D_{c_1,1,j} \right) u_n^j \right) = \\ &= d_Y + D_{c_0,0,0} + {}^{0,q} \left( D_{c_0,0,1} u_n \right) + {}^{0,q} \left( u_n D_{c_1,1,0} \right) + {}^{0,q} \left( D_{c_1,1,1}^{H_q} u_n \right) u_n = \\ &= d_Y + D_{c_0,0,0} + {}^{0,q} \left( D_{c_0,0,1} u_n \right) + {}^{0,q} \left( D_{c_1,1,0}^{H_q} u_n \right) + {}^{0,2q} \left( D_{c_1,1,1}^{H_q} u_n^2 \right); \\ N_Y - g &= \sum_{i=0}^1 {}^{0,iq} \left( u_n^i N_{c_i,i} \right) - g = (N_{c_0,0} - g) + {}^{0,q} \left( u_n N_{c_1,1} \right); \\ (N_Y - g)^2 &= (N_{c_0,0} - g)^2 + {}^{0,0} \left( (N_{c_0,0} - g)^{0,q} \left( u_n N_{c_1,1} \right) \right) + \\ &+ {}^{0,0} \left( {}^{0,q} \left( u_n N_{c_1,1} \right) (N_{c_0,0} - g) \right) + {}^{0,0} \left( {}^{0,q} \left( u_n N_{c_1,1} \right) {}^{0,q} \left( u_n N_{c_1,1} \right) \right). \end{aligned}$$

Let us combine the similar terms in the last expression. We transform for this the summands in the expression for  $(N_Y - g)^2$ . We get for the second summand:

$${}^{0,0} \left( (N_{c_0,0} - g)^{0,q} \left( u_n N_{c_1,1} \right) \right) = {}^{0,0} \left( (N_{c_0,0} - g)^{0,q} \left( N_{c_1,1} u_n \right) \right) = {}^{0,q} \left( {}^{0,0} \left( (N_{c_0,0} - g) N_{c_1,1} \right) u_n \right).$$

Let us transform the third summand as follows:

$${}^{0,0} \left( {}^{0,q} \left( u_n N_{c_1,1} \right) (N_{c_0,0} - g) \right) = {}^{0,q} \left( u_n {}^{0,0} \left( N_{c_1,1} (N_{c_0,0} - g) \right) \right).$$

Since the  $p$ -dimensional matrix  $u_n$  is fully convoluted here, than we can use the known formula for transpose the product [7] and continue:

$${}^{0,0} \left( {}^{0,q} \left( u_n N_{c_1,1} \right) (N_{c_0,0} - g) \right) = {}^{0,q} \left( u_n {}^{0,0} \left( N_{c_1,1} (N_{c_0,0} - g) \right) \right) = {}^{0,q} \left( {}^{0,0} \left( N_{c_1,1} (N_{c_0,0} - g) \right)^{H_q} u_n \right).$$

We transform now the fourth summand:

$$\begin{aligned} {}^{0,0} \left( {}^{0,q} \left( u_n N_{c_1,1} \right) {}^{0,q} \left( u_n N_{c_1,1} \right) \right) &= {}^{0,0} \left( {}^{0,q} \left( u_n N_{c_1,1} \right) {}^{0,q} \left( N_{c_1,1} u_n \right) \right) = {}^{0,q} \left( {}^{0,q} \left( u_n {}^{0,0} \left( N_{c_1,1} N_{c_1,1} \right) \right) u_n \right) = \\ &= {}^{0,2q} \left( {}^{0,0} \left( N_{c_1,1} N_{c_1,1} \right)^{H_q} u_n^2 \right). \end{aligned}$$

Finally, we get for  $(N_Y - g)^2$  the following expression:

$$(N_Y - g)^2 = (N_{c,0} - g)^2 + {}^{0,q} \left( {}^{0,0} \left( (N_{c,0} - g) N_{c,1} \right) u_n \right) + {}^{0,q} \left( {}^{0,0} \left( N_{c,1} (N_{c,0} - g) \right) \right)^{H_q} u_n + {}^{0,2q} \left( {}^{0,0} \left( N_{c,1} N_{c,1} \right)^{H_q} u_n^2 \right).$$

If we denote  $F(u_n) = D_Y + (N_Y - g)^2$ , then we get the function  $\varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = \text{tr}(F(u_n))$ , where  $F(u_n) = K_0 + {}^{0,q}(K_1 u_n) + {}^{0,2q}(K_2 u_n^2)$ ;

$$K_0 = d_Y + D_{c,0,0} + (N_{c,0} - g)^2; \tag{22}$$

$$K_1 = D_{c,0,1} + D_{c,1,0}^{H_q} + {}^{0,0} \left( (N_{c,0} - g) N_{c,1} \right) + {}^{0,0} \left( N_{c,1} (N_{c,0} - g) \right)^{H_q}; \tag{23}$$

$$K_2 = D_{c,1,1}^{H_q} + {}^{0,0} \left( N_{c,1} N_{c,1} \right)^{H_q}. \tag{24}$$

The necessary condition of the extremum of the function  $\varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})$  is the following equation:

$$\frac{d\varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})}{du_n} = {}^{0,2p} \left( \frac{d\text{tr}(F)}{dF} \frac{dF}{du_n} \right) = 0. \tag{25}$$

Since  $d\text{tr}(F)/dF = E(0, p)$ ,  $dF/du_n = K_1 + 2 {}^{0,q}(K_2 u)$ , then the condition (25) take the form:

$$\frac{d\varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})}{du_n} = {}^{0,2p} (E(0, p) K_1) + 2 {}^{0,q} \left( {}^{0,2p} (E(0, p) K_2) u \right) = L_1 + 2 {}^{0,q} (L_2 u) = 0, \tag{26}$$

where  $L_1 = {}^{0,2p} (E(0, p) K_1)$ ,  $L_2 = {}^{0,2p} (E(0, p) K_2)$ .

From the equation (26) we get the optimal value  $u_n^*$  of the control action at the last  $n$ -th instant of time:

$$u_n^* = \arg \min_{u_n} \varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = -\frac{1}{2} {}^{0,q} (L_2^{-1} L_1). \tag{27}$$

The minimal value of the function  $F(u_n)$  is defined by the expression (Appendix 2)  $F(u_n^*) = K_0 - {}^{0,q} \left( K_1 {}^{0,q} \left( {}^{0,q} K_2^{-1} K_1 \right) \right) / 4$ , and the minimal value of the function  $f_n^*(\bar{u}_{n-1}, u_n^*, \bar{y}_{n-1})$  – by the expression:

$$f_n^*(\bar{u}_{n-1}, u_n^*, \bar{y}_{n-1}) = \min_{u_n \in \mathbb{U}} \varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = \text{tr}(F(u_n^*)) = \text{tr} \left( K_0 - \frac{1}{4} {}^{0,q} \left( K_1 {}^{0,q} \left( {}^{0,q} K_2^{-1} K_1 \right) \right) \right). \tag{28}$$

The search of the optimal control action  $u_n^*$  at the last  $n$ -th instant of time finished there and the search of the optimal control action  $u_{n-1}^*$  at the penultimate  $(n-1)$ -th instant of time starts. The control action  $u_{n-1}^*$  is defined by the following expression (the formula (3)):

$$u_{n-1}^* = \arg \min_{u_{n-1} \in \mathbb{U}} \left[ \varphi_{n-1}(\bar{u}_{n-1}, \bar{y}_{n-2}) + \int_{\Omega(y_{n-1})} f_n^*(\bar{u}_{n-1}, u_n^*, \bar{y}_{n-1}) f(y_{n-1} / \bar{u}_{n-1}, \bar{y}_{n-2}) d\Omega \right]. \tag{29}$$

The function  $f_n^*(\bar{u}_{n-1}, u_n^*, \bar{y}_{n-1})$  (28) in (29) is integrated by  $y_{n-1}$  with weight function  $f(y_{n-1} / \bar{u}_{n-1}, \bar{y}_{n-2})$  and then minimized by  $u_{n-1}$  in sum with  $\varphi_{n-1}(\bar{u}_{n-1}, \bar{y}_{n-2})$ . One can understand, that the matrices  $K_0, K_1, K_2$  in (28) depend by  $u_{n-1}$  by means the  $N_{c,0}, N_{c,1}, N_{c,2}, D_{c,0,0}, D_{c,0,1}, D_{c,1,0}, D_{c,1,1}$  in (22)–(24), which are determined by formulae (11)–(13) provided  $S_{u^k u^\lambda} = {}^{0,0} (u_{n-1}^k u_{n-1}^\lambda)$ ,  $S_{yu^\lambda} = {}^{0,0} (y_{n-1} u_{n-1}^\lambda)$ :

$$D_c^{-1} = \{D_c^{i,j}\} = \{d_c^{i,j} + S_{i,j}\} = \left\{ d_c^{i,j} + \left( {}^{0,0} \left( d_Y^{-1} S_{u^i u^j} \right) \right) \right\}, \quad i, j = \overline{0,1};$$



$$B = \{B_i\} = \left\{ \sum_{j=0}^m {}^{0,jq+p} (d_{c_i}^{i,j} v_{c_i,j}) + {}^{0,p} (d_Y^{-1} S_{yu^i}) \right\}, \quad i = \overline{0,1};$$

$$N_{c_i} = \{N_{c_i,i}\} = {}^{0,1} \{D_{c_i} B\} = \left\{ \sum_{j=0}^m {}^{0,p+jq} (D_{c_i,i,j} B_j) \right\}, \quad i = \overline{0,1};$$

$$S_{u^k u^\lambda} = {}^{0,0} (u_{n-1}^k u_{n-1}^\lambda); \quad S_{yu^\lambda} = {}^{0,0} (y_{n-1} u_{n-1}^\lambda).$$

Let us write down these expressions in details:

$$D_{c_i}^{-1} = \begin{Bmatrix} d_{c_i}^{0,0} + d_Y^{-1} & d_{c_i}^{0,1} + {}^{0,0} (d_Y^{-1} u_{n-1}) \\ d_{c_i}^{1,0} + {}^{0,0} (d_Y^{-1} u_{n-1}) & d_{c_i}^{1,1} + {}^{0,0} (d_Y^{-1} u_{n-1}^2) \end{Bmatrix};$$

$$B = \{B_i\} = \begin{Bmatrix} {}^{0,0} (d_{c_i}^{0,0} v_{c_i,0}) + {}^{0,q} (d_{c_i}^{0,1} v_{c_i,1}) + {}^{0,0} (d_Y^{-1} y_{n-1}) \\ {}^{0,0} (d_{c_i}^{1,0} v_{c_i,0}) + {}^{0,q} (d_{c_i}^{1,1} v_{c_i,1}) + {}^{0,0} (d_Y^{-1} y_{n-1} u_{n-1}) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B_0 \\ B_1 \end{Bmatrix};$$

$$N_{c_i,i} = \sum_{j=0}^1 {}^{0,jq} (D_{c_i,i,j} B_j) = {}^{0,0} (D_{c_i,i,0} B_0) + {}^{0,q} (D_{c_i,i,1} B_1);$$

$$N_{c_i,0} = {}^{0,0} (D_{c_i,0,0} B_0) + {}^{0,q} (D_{c_i,0,1} B_1); \quad N_{c_i,1} = {}^{0,0} (D_{c_i,1,0} B_0) + {}^{0,q} (D_{c_i,1,1} B_1); \quad N_{c_i,2} = {}^{0,0} (D_{c_i,2,0} B_0) + {}^{0,q} (D_{c_i,2,1} B_1).$$

It is impossible to write down the explicit expressions for the  $D_{c_i,i,j}$  as the functions by  $u_{n-1}$ , since they are the elements of the cell inverse to the cell  $D_{c_i}^{-1}$ . As a result, it is impossible to perform the analytical minimization in the expression (29). The numerical minimization in the expression (29) is impossible too.

However, the control action (27), obtained at the last instant of time, can be used at any instant of time. We will call the expression (27) the algorithm of the optimal dual control with passive information storage. The developed algorithm (27) has the theoretical and algorithmical generality.

### Computer simulation

The algorithm of the optimal dual control with passive information storage (27) was realized programmatically, utilized at a number of objects and showed results acceptable for practice. For instance, the regression object with vector input and output variables and affine regression function (8) was simulated with following coefficients and variance-covariance matrix of the inner noise:

$$c_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}; \quad c_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}; \quad d_Y = \begin{pmatrix} 0,001 & 0 \\ 0 & 0,001 \end{pmatrix}. \quad (30)$$

The prior characteristics of the coefficients of the approximating polynomial (8) and initial control action  $u_0$  are simulated as random.

The sequence of the control actions is showed in a Fig. 2 for some variant of the simulation.

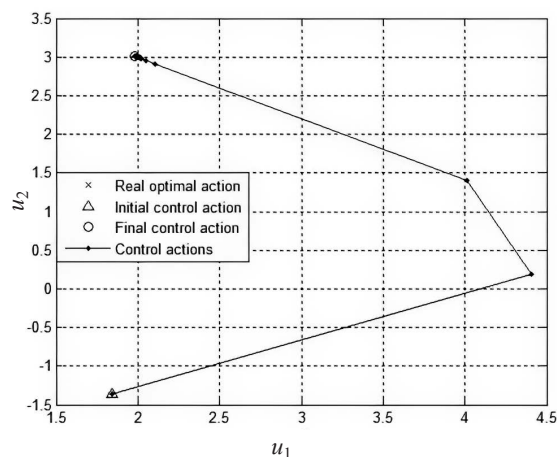


Fig. 2. The sequence of the control actions for the simulated instance

The Fig. 2 corresponds to the following priory characteristics of the coefficients of the approximating polynomial (8): priory mathematical expectations

$$v_{c_0} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}; v_{c_1} = \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 4 & 5 \end{pmatrix}$$

and priory variance-covariance matrices

$$d_{c,1,1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; d_{c,2,2} = \begin{pmatrix} \overset{1,1,1,1}{\hat{1}} & \overset{1,1,2,1}{\hat{0}} & \overset{1,1,1,2}{\hat{0}} & \overset{1,1,2,2}{\hat{0}} \\ \overset{2,1,1,1}{\hat{0}} & \overset{2,1,2,1}{\hat{1}} & \overset{2,1,1,2}{\hat{0}} & \overset{2,1,2,2}{\hat{0}} \\ \overset{1,2,1,1}{\hat{0}} & \overset{1,2,2,1}{\hat{0}} & \overset{1,2,1,2}{\hat{1}} & \overset{1,2,2,2}{\hat{0}} \\ \overset{2,2,1,1}{\hat{0}} & \overset{2,2,2,1}{\hat{0}} & \overset{2,2,1,2}{\hat{0}} & \overset{2,2,2,2}{\hat{1}} \end{pmatrix}.$$

The four-dimensional matrix  $d_{c,2,2}$  is presented by an associated with it two-dimensional matrix. The covariance matrices  $d_{c,1,2}$  and  $d_{c,2,1}$  are taken as zero matrices of appropriate sizes. The Fig. 2 illustrates the stabilization of the regression function at the level  $g = (9 \ 20)$ . As it follows from the object description (30), the regression function has the value  $y = g = (9 \ 20)$  provided control action  $u = (2 \ 3)$ . One can see in the Fig. 2 that this value of the control action is reached.

### Appendix 1

*Theorem.* If  $z = (z_{i_1, i_2, \dots, i_p})$  be a  $p$ -dimensional random matrix with mathematical expectation  $E(z) = N_z$  and variance-covariance matrix  $D_z$ , then the mathematical expectation of the square of the Euclidean norm of the matrix  $z$  is defined by the following expression:

$$E(\|z\|^2) = E({}^{0,p}(zz)) = \text{tr}(D_z + N_z^2),$$

where  $\text{tr}(\cdot)$  means the trace of the matrix;  ${}^{0,p}(zz)$  is the  $(0, p)$ -convoluted square of the matrix  $z$ ;  $N_z^2$  is the  $(0, 0)$ -convoluted square of the matrix  $N_z$ .

*Proof.* The square of the Euclidean norm of the matrix  $z$  is defined by the formula

$$\|z\|^2 = \sum_{i_1, i_2, \dots, i_p} z_{i_1, i_2, \dots, i_p}^2 = \sum_{i_1, i_2, \dots, i_p} z_{i_1, i_2, \dots, i_p} z_{i_1, i_2, \dots, i_p} = {}^{0,p}(zz).$$

Then

$$E(\|z\|^2) = E\left(\sum_{i_1, i_2, \dots, i_p} z_{i_1, i_2, \dots, i_p}^2\right) = \sum_{i_1, i_2, \dots, i_p} E\left(z_{i_1, i_2, \dots, i_p}^2\right) = \sum_{i_1, i_2, \dots, i_p} \left(E^2(z_{i_1, i_2, \dots, i_p}) + D(z_{i_1, i_2, \dots, i_p})\right),$$

where  $D(z_{i_1, i_2, \dots, i_p})$  is the variation of the random variable  $z_{i_1, i_2, \dots, i_p}$ .

Thus  $E(\|z\|^2) = \sum_{i_1, i_2, \dots, i_p} E^2(z_{i_1, i_2, \dots, i_p}) + \sum_{i_1, i_2, \dots, i_p} D(z_{i_1, i_2, \dots, i_p}) = \text{tr}(E^2(z) + D(z))$ . The theorem is proved.

If  $y = z - g$ , where  $g$  is a constant matrix, then  $D_y = D_z$ ,  $E(y) = N_z - g$ , and  $E(\|z - g\|^2) = \text{tr}(D_z + (N_z - g)^2)$ .

### Appendix 2

Let  $x = (x_{j(q)})$ ,  $j_{(q)} = (j_1, j_2, \dots, j_q)$ , be a  $q$ -dimensional matrix, that is the argument of a  $p$ -dimensional-matrix function  $y = (y_{i(p)})$ ,  $i_{(p)} = (i_1, i_2, \dots, i_p)$ , and this function has the form  $y = \varphi(x) = c_0 + {}^{0,q}(c_1x) + {}^{0,2q}(c_2x^2) = c_{i,0} + {}^{0,q}(xc_{i,1}) + {}^{0,2q}(x^2c_{i,2})$ , where  $c_k$ ,  $k = 0, 1, 2$ , are the  $(p + kq)$ -dimensional-matrix coefficients of the function  $\varphi(x)$ , and  $c_2$  is symmetric relative its last  $q$ -multi-indexes. Let it be required to find the extremum of this function.

Optimal value of  $x$  can be found from the equation  $\partial\varphi(x) / \partial x = 0$ . Differentiating of  $\varphi(x)$  gives the equation  $\hat{c}_1 + 2 {}^{0,q}(c_2x) = 0$ . Hence  $x_n^* = - {}^{0,q}(c_2^{-1}c_1) / 2$ , where  ${}^{0,q}c_2^{-1}$  is the matrix  $(0, q)$ -inverse to the matrix  $c_2$ .

Let us to find the minimum value  $y^* = \varphi(x^*)$  of the function  $\varphi(x)$ . Since  ${}^{0,2q}(c_2x^2) = {}^{0,q}({}^{0,q}(c_2x)x)$  and the equation  ${}^{0,q}(c_2x_n^*) = -c_1/2$  for  $x = x^*$  is fulfilled, we have  ${}^{0,2q}(c_2(x_n^*)^2) = -{}^{0,q}(c_1x_n^*)/2$  and  $y^* = \varphi(x^*) = c_0 + {}^{0,q}(c_1x^*) + {}^{0,2q}(c_2(x^*)^2) = c_0 + {}^{0,q}(c_1x^*) - \frac{1}{2} {}^{0,q}(c_1x^*) = c_0 + {}^{0,q}(c_1x^*)$ .

Substituting  $x_n^*$  into this expression gives

$$y^* = c_0 - \frac{1}{4} {}^{0,q} \left( c_1 {}^{0,q} \left( {}^{0,q} c_2^{-1} c_1 \right) \right).$$

## Conclusions

To sum up, the general solution to the problem of the dual stabilization of the multidimensional regression object at the given level with passive information storage in the Gaussian case was obtained for the first time. The important advantages of the developed algorithm are theoretical and algorithmical generality. This solution can be applied to control of the various technological processes with many input and output variables, but each of them requires separate consideration.

## References

1. Mukha V. S., Kako N. F. (2019) Dual Control of Multidimensional-Matrix Stochastic Objects. *Information Technologies and Systems 2019 (ITS 2019): Proceedings of the International Conference, BSUIR, Minsk, 30 Oct. 2019*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 236–237.
2. Feldbaum A. A. (1963) *Fundamentals of the Theory of the Optimal Automatic Systems*. Moscow, Nauka Publ. 553 (in Russian).
3. Feldbaum A. A. (1965) *Optimal Control Systems*. New York, Academic Press Publ. 452.
4. Mukha V. S. (1973) On the Dual Control of the Inertialess Objects. *Proceedings of the LETI*. (130), 31–37 (in Russian).
5. Mukha V. S., Sergeev E. V. (1976) Dual Control of the Regression Objects. *Proceedings of the LETI*. (202), 58–64 (in Russian).
6. Mukha V. S. (2004) *Analysis of Multidimensional Data*. Minsk, Technoprint Publ. 368 (in Russian).
7. Mukha V. S., Kako N. F. (2022) Total Probability and Bayes Formulae for Joint Multidimensional-Matrix Gaussian Distributions. *Vestsi Natsyianal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryia Fizika-Matematychnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics Series*. 58 (1), 48–59. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2022-58-1-48-59>.

## Authors' contribution

Mukha V. S. developed and wrote the article.

Kako N. F. was directly involved in developing and writing the article.

## Information about the authors

**Mukha V. S., D. Sci.**, Professor, Professor at the Department of Information Technologies of Automated Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Kako N. F.**, Postgraduate at the 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 44 781-16-51  
E-mail: mukha@bsuir.by  
Mukha Vladimir Stepanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-68-76>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 623.482

## АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ, ПОСТРОЕННЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ

Е. И. МИХНЁНОК, А. В. ХИЖНЯК

*Военная академия Республики Беларусь (г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 18.01.2023*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Рассмотрен аппаратно-программный комплекс для исследования совместного применения технических средств, построенных на различных физических принципах. Данный комплекс представляет собой совокупность совместно функционирующих технических средств охраны (оптико-электронной системы, сейсмодатчиков, волоконно-оптических датчиков), решающих задачу автоматического обнаружения движущихся объектов в заданной области пространства. В основе аппаратно-программного комплекса лежит разработанный авторами пост технического наблюдения, обеспечивающий решение задач автоматического обнаружения движущихся объектов в поле зрения датчиков системы, а также совместного функционирования с другими техническими средствами охраны. Описаны его особенности и возможности. Представлены результаты оценки эффективности от внедрения разработанного аппаратно-программного комплекса в состав интегрированной системы охраны на примере одного из подразделений охраны государственной границы. Эффект заключается в снижении вероятности возникновения ошибки при принятии решения о наличии «реального» нарушителя, а также в случае увеличения вероятности его обнаружения. Приведены результаты натурных испытаний аппаратно-программного комплекса в реальных условиях эксплуатации на участке государственной границы.

**Ключевые слова:** аппаратно-программный комплекс, пост технического наблюдения, эффективность.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Михнёнок, Е. И. Аппаратно-программный комплекс для исследования совместного применения технических средств, построенных на различных физических принципах / Е. И. Михнёнок, А. В. Хижняк // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 2. С. 68–76. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-68-76>.

## HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR THE STUDY OF THE JOINT USE OF TECHNICAL MEANS BASED ON VARIOUS PHYSICAL PRINCIPLES

EVGENY I. MIKHNIIONOK, ALEXANDER V. KHIZNIAK

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

*Submitted 18.01.2023*

**Abstract.** The article considers the hardware and software complex developed by the authors for the study of the joint use of technical means built on various physical principles. This hardware and software complex is a set of jointly functioning security equipment (optoelectronic system, seismic sensors, fiber-optic sensors) that solve the problem of automatic detection of moving objects in a given area of space. The hardware and software complex is based on the technical observation post developed by the authors, which provides solutions to the problems

of automatic detection of moving objects in the field of view of the system sensors, as well as joint functioning with other technical means of protection. Its features and capabilities are described. The results of evaluating the effectiveness of the implementation of the developed hardware and software complex in the integrated security system are presented, using the example of one of the state border protection units. The effect is to reduce the probability of an error when making a decision about the presence of a “real” violator, as well as to increase the probability of their detection. The results of field tests of the hardware and software complex in real operating conditions on the state border section are presented.

**Keywords:** hardware and software complex, post of technical supervision, efficiency.

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

**For citation.** Mikhniouk E. I., Khizniak A. V. (2023) Hardware and Software Complex for the Study of the Joint Use of Technical Means Based on Various Physical Principles. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 68–76. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-68-76> (in Russian).

## Введение

В настоящее время для решения задач охраны различных объектов применяется огромное многообразие технических средств. Все они характеризуются свойственными каждому в отдельности достоинствами и недостатками. При этом недостатки одних технических средств возможно устранить совместным применением с ними средств, построенных на других физических принципах. Вопросы исследования совместного применения технических средств, решающих задачи охраны (особенно критически важных объектов), имеют огромное значение ввиду постоянно возрастающей актуальности.

В статье представлен разработанный авторами аппаратно-программный комплекс для исследования совместного функционирования технических средств, построенных на различных физических принципах, при решении задач охраны государственной границы. Приведены результаты как реализации предложенных решений на примере одного подразделения, так и натуральных испытаний.

## Описание аппаратно-программного комплекса

В целях решения задач охраны государственной границы в пограничной полосе создаются рубежи с различными техническими средствами охраны (ТСО), которые обеспечивают обнаружение нарушителей границы, тем самым давая подразделениям охраны провести их задержание в пределах своих зон ответственности. По типам технические средства охраны подразделяются на: технические средства и системы охраны; технические средства и системы наблюдения; технические средства и системы освещения местности. По принципу действия технические средства, применяемые для решения задачи обнаружения нарушителей, делятся на группы, приведенные на рис. 1.



**Рис. 1.** Классификация технических средств охраны  
**Fig. 1.** Classification of technical means of protection

Приведенные на рис. 1 технические средства в своей совокупности создают интегрированную систему охраны, характеризующуюся системой сбора и обработки информации, интегрированной в единое информационное поле<sup>1</sup>. Необходимая информация отображается на месте несения службы дежурного по подразделению охраны. Наибольшее распространение получили автономный сигнализационный комплекс (АСК) «Радиобарьер» и комплекс периметровых средств обнаружения (КПСО) «Ворон».

<sup>1</sup> Инструкция об организации инженерного обеспечения оперативно-служебной деятельности территориальных органов пограничной службы Республики Беларусь: утв. приказом председателя Государственного пограничного комитета Республики Беларусь 14.07.2017 № 351. 136 с.

АСК «Радиобарьер» представляет собой совокупность радиосигнализаторов, которые размещаются на участке местности, создавая протяженные рубежи обнаружения с общими зонами перекрытия между отдельными средствами обнаружения<sup>2</sup>. Основным достоинством системы является возможность полной ее маскировки, так как средства обнаружения устанавливаются в грунт. Одно средство обеспечивает обнаружение человека (одиночного или группы) в радиусе до 100 м от места установки, а транспортного средства – до 200 м. Время автономной работы поддерживается собственным источником питания до пяти лет.

КПСО «Ворон» обеспечивает создание протяженных многозонных и многорубежных периметровых систем обнаружения на основе волоконно-оптических распределенных датчиков деформаций на деформируемых заграждениях различных типов<sup>3</sup>. Попытка преодоления заграждения определяется посредством механического воздействия заграждения, что вызывает деформацию кабеля, тем самым изменяя фазовые характеристики лазерного излучения, распространяющегося в световедущей жиле. Эти изменения анализируются в целях идентификации сигнала тревоги. Данный комплекс позволяет организовать охрану участка до 50 000 м (определяется максимальным удалением адресной зоны от аппаратно-программной части) с длиной охраняемой зоны до 500 м. Однако для этих комплексов (первые модификации) характерно отсутствие возможности визуального отображения причины своего срабатывания. Решение данной проблемы возможно путем совместного применения с ними специализированной оптико-электронной системы наблюдения в виде поста технического наблюдения (ПТН).

Разработанный авторами пост технического наблюдения представляет собой поворотную платформу с телевизионным и тепловизионным каналами наблюдения (рис. 2), автономными источниками питания, а также с автоматизированным рабочим местом (АРМ) оператора со специальным программным обеспечением ПТН, реализующим управление системой, обработку информации и ее отображение.



Рис. 2. Внешний вид поворотной платформы поста технического наблюдения

Fig. 2. Appearance of the post of technical supervision rotary platform

Тепловизионный датчик оборудован системой трехкратного оптического увеличения (1x, 1.1x, 1.2x, ..., 3x) наблюдаемой сцены с изменяющимся полем зрения от 12°x9° до 4°x3°. Информация, поступающая от тепловизионного канала наблюдения, анализируется алгоритмом обработки изображений [1–3], что обеспечивает решение задачи автоматического обнаружения нарушителей типа «человек, транспортное средство». Телевизионный канал ПТН является дополнением к основному тепловизионному и помогает оператору как в оценке обстановки вблизи места срабатывания ТСО, так и для распознавания причины его срабатывания.

<sup>2</sup> Официальный сайт компании ООО «ПОЛЮС-СТ» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://polus-st.ru/products/radiobarrier>. Дата доступа: 12.12.2022.

<sup>3</sup> Официальный сайт компании ООО «Прикладная радиофизика» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.neuro-photonica.ru>. Дата доступа: 12.12.2022.

Отличительными особенностями разработанного ПТН являются:

– возможность совместной работы с ТСО, размещенными на одном рубеже (в рамках интегрированной системы охраны подразделения государственной границы), в целях отображения дежурному по подразделению информации о месте и причине их срабатывания;

– автоматическое обнаружение потенциальных нарушителей на подступах к рубежам охраны для пресечения попыток нарушения государственной границы или их своевременного задержания.

В целях исследования физических процессов, протекающих в интегрированной системе охраны, включающей в свой состав технические средства, построенные на различных физических принципах, разработан соответствующий аппаратно-программный комплекс (АПК). Отличительная особенность АПК – использование реальных технических средств охраны со штатным программным обеспечением и реализованными в нем алгоритмами обработки информации. В его состав входят:

– АСК «Радиобарьер» (радиосигнализатор, АРМ оператора);

– КПСО «Ворон» (элемент заграждения, аппаратно-программная часть комплекса);

– пост технического наблюдения (поворотная платформа с датчиками видеоинформации, АРМ оператора).

Ключевым обстоятельством при разработке АПК являлась реализация сопряжения данных технических систем. С точки зрения решения задачи совместного обнаружения движущихся объектов от ТСО должна поступать информация о месте их срабатывания. Совместно с разработчиками КПСО «Ворон» и АСК «Радиобарьер» было доработано специальное программное обеспечение данных комплексов для организации передачи информации о месте срабатывания их элементов на пост технического наблюдения. Таким образом, основным элементом АПК является ПТН, так как на нем осуществляются обработка основного объема информации и ее отображение. Структурная схема АПК представлена на рис. 3.

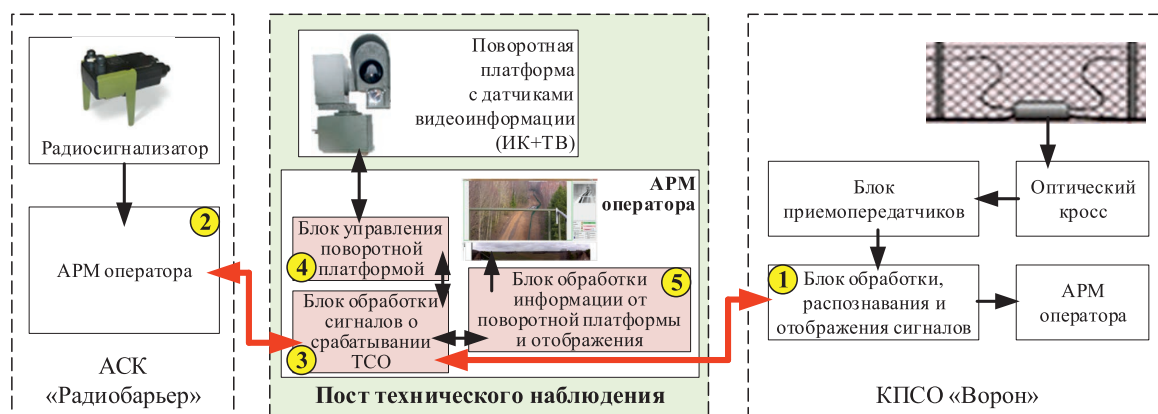


Рис. 3. Структурная схема аппаратно-программного комплекса  
Fig. 3. Block diagram of the hardware and software complex

Порядок совместной работы данных технических средств в составе АПК заключается в следующем. При срабатывании ТСО с «Блока обработки, распознавания и отображения сигналов» (1) КПСО «Ворон» или АРМ оператора (2) АСК «Радиобарьер» на блок обработки сигналов о срабатывании ТСО (3) АРМ оператора ПТН передается сообщение о сработавшем участке средства охраны (при подготовке к работе ПТН вводятся данные об охранных участках комплексов). С блока (3) на блок управления поворотной платформой (4) передается информация (азимут, угол места, значение оптического увеличения датчика) для наведения датчиков видеоинформации на сработавший участок средства охраны. Далее с блока обработки информации от поворотной платформы и отображения (5) фоновая обстановка вблизи места срабатывания ТСО выводится на отображение оператору ПТН. АПК позволяет:

– выполнять исследования совместного функционирования технических средств в рамках интегрированной системы охраны;

– исследовать алгоритмы автоматического обнаружения (сопровождения, распознавания) движущихся объектов как в режиме реального времени по данным от датчиков видеоинформации, так и с заранее подготовленными видеопоследовательностями;

- проводить исследования и оценку как существующих, так и вновь разрабатываемых алгоритмов автоматического обнаружения (сопровождения, распознавания) движущихся объектов в условиях изменяемой фоноцелевой обстановки и различных возмущающих факторов;
- дорабатывать специальное программное обеспечение ТСО, обосновывать правильность принятых технических решений при модернизации систем, входящих в состав АПК.

### Результаты оценки эффективности применения поста технического наблюдения в составе интегрированной системы подразделения охраны

Для оценки эффективности совместного применения ПТН с другими ТСО использовали методику, описанную в [4, 5]. Принимали, что на рубеже охраны установлены ТСО и ПТН. ТСО исправны, т. е. вероятность технически исправного состояния ТСО  $P_{тс}$  и вероятность доставки сообщения об обнаруженном нарушителе  $P_{д}$  равны 1. Вероятность обнаружения ТСО, согласно его тактико-техническим характеристикам, соответственно  $P_{о_{ij}} = P_{отсоi} = 0,98$ . Общее количество срабатываний ТСО – 7176, из них: от «реального» нарушителя – 9, ложных – 7167 (от животного – 4672, от фона – 2486). Учитывая данные показатели, согласно выражению (10) [5], определяли значения вероятностей появления  $i$ -го нарушителя  $P_{нi}$ , животного  $P_{ж}$ , функционирования ТСО в отсутствие воздействий от нарушителей и животных  $P_{ф}$ , ложного срабатывания от фона  $P_{лсф}$ , вероятность пропуска  $i$ -го нарушителя  $P_{проп_i} = \prod_i (1 - P_{о_{ij}})$ :

$$P_{нi} = \frac{9}{7176} = 0,0013; \quad P_{ж} = \frac{4672}{7176} = 0,6511; \quad P_{ф} = 1 - (P_{нi} + P_{ж}) = 1 - (0,0013 + 0,6511) = 0,3477;$$

$$P_{лсф} = \frac{2486}{7176} = 0,3464; \quad P_{к} = 1 - \frac{4672 + 2486}{7176} = 0,002.$$

Значение  $P_{к}$  – вероятность правильной классификации причины срабатывания ТСО, зависит от его возможностей по отображению визуальной информации о причинах срабатывания дежурному по подразделению охраны. При наличии такой возможности  $P_{к}$  определяется способностью оператора распознать причину срабатывания ТСО. Проведенные исследования показали, что данное значение стремится к единице. Для дальнейших расчетов принимали  $P_{к} = 0,99$ . При отсутствии данной возможности  $P_{к}$  определяли из выражения

$$P_{к} = 1 - \frac{C_{ж} + C_{ф}}{C_{общ}}, \quad (1)$$

где  $C_{ж}$ ,  $C_{ф}$  – число срабатываний ТСО от животных и от фона;  $C_{общ}$  – общее число срабатываний ТСО.

Подставив величины вышеуказанных вероятностей в выражение (12) [5], получили значение вероятности появления ошибки при принятии решения о наличии «реального» нарушителя государственной границы (НГГ)  $P_{ош_i}$ :

$$P_{ош_i} = P_{ош1_i} + P_{ош2_i} = (P_{нi} (1 - P_{о_{ij}})(1 - P_{к})) + (P_{ж} (1 - P_{проп_i})(1 - P_{к}) + P_{ф} P_{лсф} (1 - P_{к})) =$$

$$= (0,0013 \cdot (1 - 0,98) \cdot (1 - 0,002)) + (0,6511 \cdot (1 - (1 - 0,98))) + 0,3477 \cdot 0,3464 \cdot (1 - 0,002) = 0,76, \quad (2)$$

где  $P_{ош1_i}$  – вероятность пропуска  $i$ -го нарушителя в естественных условиях функционирования;  $P_{ош2_i}$  – вероятность ложной тревоги в естественных условиях функционирования.

Тогда вероятность обнаружения «реального» нарушителя в соответствии с выражением (16) [5] запишется в виде

$$P_{обн_i}^k = \left( 1 - \prod_{j=1}^M (1 - P_{о_{ij}}) \right) \cdot (1 - P_{ош_i}) = (1 - (1 - P_{отсоi})) \cdot (1 - P_{ош_i}) = (1 - (1 - 0,98)) \cdot (1 - 0,76) = 0,24. \quad (3)$$

Учитывая вероятность обнаружения НГГ ПТН ( $P_{оптн} = 0,98$ ), получили значение вероятности появления ошибки при принятии решения о наличии «реального» НГГ при совместном использовании ТСО и ПТН:



$$P_{\text{ош}_i} = P_{\text{ош}_{1i}} + P_{\text{ош}_{2i}} = (P_{H_i} (1 - P_{o_{ij}})(1 - P_K)) + (P_{Ж} (1 - P_{\text{проп}_i})(1 - P_K) + P_{\Phi} P_{\text{лсф}} (1 - P_K)) =$$

$$= (0,0013 \cdot (1 - 0,98) \cdot (1 - 0,98) \cdot (1 - 0,002)) +$$

$$+ (0,6511 \cdot (1 - (1 - 0,98)) \cdot (1 - 0,98)) + 0,3477 \cdot 0,3464 \cdot (1 - 0,002) = 0,0077. \quad (4)$$

Тогда вероятность обнаружения «реального» НГГ при совместном использовании ТСО и ПТН

$$P_{\text{обн}_i}^k = \left(1 - \prod_{j=1}^M (1 - P_{o_{ij}})\right) \cdot (1 - P_{\text{ош}_i}) = \left(1 - (1 - P_{\text{оТСО}_i}) \cdot (1 - P_{\text{оПТН}_i})\right) \cdot (1 - P_{\text{ош}_i}) =$$

$$= (1 - (1 - 0,98) \cdot (1 - 0,98)) \cdot (1 - 0,0077) = 0,99. \quad (5)$$

Таким образом, совместное применение ПТН с другими ТСО на одном рубеже охраны позволяет снизить вероятности появления ошибки при принятии решения о наличии «реального» нарушителя не менее чем в 90 раз, повысить эффективность интегрированной системы охраны отдельной пограничной заставы (поста) не менее чем в три раза за счет повышения вероятности обнаружения «реального» нарушителя государственной границы. Правильное принятие решения дежурным по подразделению охраны о наличии реального НГГ сокращает количество выездов тревожных групп на участки срабатывания ТСО. Это приводит к уменьшению служебной нагрузки на личный состав подразделения охраны, уменьшает количество использованного моторесурса транспортных средств, экономит топливо. Произвести расчеты первых двух показателей не представляется возможным ввиду сложности их формализации. Однако на основании данных о срабатывании ТСО можно рассчитать экономический эффект от экономии топлива.

В табл. 1 представлен расчет перерасхода денежных средств для основных типов транспортных средств, используемых для доставки тревожных групп, с учетом среднего расхода топлива, заявленного в их тактико-технических характеристиках для одного подразделения охраны.

**Таблица 1.** Результаты расчета перерасхода денежных средств и топлива, использованного для реагирования на ложные срабатывания

**Table 1.** Calculation results of overspending of funds and fuel used to respond to false alarms

№ участка	Среднее расстояние до участка, км	Среднее расстояние за год, км	По реальным нарушителям, км	УАЗ-469 (10,6 л/100 км)		УАЗ-452 (17,2 л/100 км)		ГАЗ-3308 (16,8 л/100 км)		МЗКТ-500200 (30 л/100 км)	
				Все выезды	По нарушениям	Все выезды	По нарушениям	Все выезды	По нарушениям	Все выезды	По нарушениям
1	7,5	3930	15	416,5	1,6	675,9	2,58	660,2	2,5	1179	4,5
2	5,5	2134	33	226,2	3,5	367,1	5,7	358,5	5,5	640,2	9,9
3	7,5	2070	0	219,4	0	356,1	0	347,7	0	621	0
4	5,5	3146	0	333,4	0	541,1	0	528,5	0	943,8	0
5	7,5	3180	15	337,1	1,6	546,9	2,6	534,2	2,5	954	4,5
6	7	3444	14	365,1	1,5	592,3	2,4	578,5	2,4	1033,2	4,2
7	9	4212	36	446,5	3,8	724,4	6,2	707,6	6	1263,6	10,8
8	11	2860	0	303,1	0	491,9	0	480,4	0	858	0
9	12	8064	0	854,7	0	1387,1	0	1354,7	0	2419,2	0
10	10	6000	40	636	4,2	1032	6,9	1008	6,7	1800	12
11	12	5712	0	605,4	0	982,4	0	959,6	0	1713,6	0
Всего			153	4743,7	16,2	7697,3	26,3	7518,3	25,7	13425,6	45,9
Количество использованного топлива по ложным срабатываниям, л				4727,5		7671,1		7492,6		13379,7	
Перерасход денежных средств при цене 1 л дизельного топлива 2,46 руб. (на 26.07.2022), бел. руб.				11156,9		18103,6		18431,9		32914,1	

Из табл. 1 видно, что, например, при использовании в качестве средства доставки МЗКТ-500200 с расходом 30 л на 100 км пути для реагирования на все срабатывания с учетом их отдаленности от пункта постоянной дислокации будет израсходовано 13425,6 л топлива. Однако по реальным нарушителям – только 45,9 л, что при цене 1 л дизельного топлива в размере 2,46 руб. (на 26.07.2022) приводит к перерасходу денежных средств для пограничной заставы (поста) в размере 32914 руб. 10 коп.

### **Результаты испытаний поста технического наблюдения в реальных условиях эксплуатации**

Проведение испытаний и опытную эксплуатацию ПТН осуществляли на базе нескольких пограничных групп. Поворотную платформу с телевизионным и тепловизионным каналами ПТН устанавливали на наблюдательной вышке. АРМ оператора ПТН было развернуто в помещении дежурного по заставе, откуда проводилось управление поворотной платформой. Связь между АРМ и поворотной платформой была организована по оптоволоконным линиям связи на удалении 4050 м. При испытаниях присутствовали представители Государственного пограничного комитета Республики Беларусь, ОАО «Пеленг» и Военной академии Республики Беларусь. Погодные условия характеризовались наличием тумана и мелкого дождя, что, в свою очередь, позволило провести испытания наиболее приближенно к реальным условиям эксплуатации.

С целью определения возможности автоматического обнаружения НГГ представителями Госпогранкомитета был определен маршрут движения НГГ, в качестве которых выступал автомобиль и военнослужащий органов пограничной службы. Для определения дальности автоматического обнаружения НГГ использовался режим функционирования ПТН «Неподвижный поиск». Поле зрения камеры находилось в направлении появления объекта обнаружения. Значение оптического увеличения для тепловизионного канала наблюдения установлено 3х.

При выходе автомобиля из лесного участка на основной рубеж охраны произвели автоматическое обнаружение объекта с воспроизведением сигнала тревоги. Движение автомобиля было остановлено, определены координаты его местоположения. После этого из автомобиля вышел военнослужащий, который также был автоматически обнаружен. Дальность автоматического обнаружения для значения оптического увеличения 3х тепловизионного канала ПТН в данных условиях наблюдения составила 2040 м. Аналогичным образом произвели определение дальности автоматического обнаружения НГГ для значения оптического увеличения 1х тепловизионного канала ПТН, что, в свою очередь, составило 860 м.

В случае проверки режима функционирования «Взаимодействие с ТСО» воздействовали на охранное ограждение КПСО «Ворон» для срабатывания системы обнаружения. После получения сигнала «Тревога» от КПСО «Ворон» поворотная платформа автоматически произвела поворот в направлении сработавшего участка и наведение поля зрения на него.

Для проверки возможности функционирования ПТН в режиме «Поиск в секторе» оператором был установлен сектор сканирования 85° вдоль основного рубежа охраны. НГГ двигался вдоль основного рубежа охраны государственной границы. При появлении нарушителя государственной границы в анализируемом участке сектора сканирования он автоматически был обнаружен. В процессе исследований выполнили 20 опытов: 10 в ночное время суток и 10 – в дневное. Во всех случаях автоматическое обнаружение нарушителя было произведено. Пример обнаружения движущегося транспортного средства представлен на рис. 4.

Однако для подтверждения заявленной вероятности обнаружения данного количества опытов, естественно, недостаточно. Поэтому в течение подконтрольной эксплуатации ПТН проводилось обнаружение пограничных нарядов, осуществляющих патрулирование вдоль основного рубежа охраны государственной границы. Результаты 2179 опытов по обнаружению учебного НГГ показали, что в 2134 случаях ПТН произвел автоматическое обнаружение нарушителя. Таким образом, полученные результаты показывают, что разработанный пост технического наблюдения обеспечивает автоматическое обнаружение нарушителей государственной границы с вероятностью 0,98.



Рис. 4. Пример обнаружения движущегося транспортного средства  
Fig. 4. Example of detecting a moving vehicle

### Заключение

1. Аппаратно-программный комплекс представляет собой совокупность совместно функционирующих технических средств (оптико-электронной системы, сейсмодатчиков, волоконно-оптических датчиков), построенных на различных физических принципах и решающих задачу автоматического обнаружения движущихся объектов. Такой комплекс позволяет проводить исследование и оценку как существующих, так и вновь разрабатываемых алгоритмов автоматического обнаружения оптически наблюдаемых объектов в условиях изменяемой фоновой обстановки и различных возмущающих факторов.

2. Применение аппаратно-программного комплекса на участке государственной границы позволило снизить вероятность возникновения ошибки при принятии решения о наличии «реального» нарушителя не менее чем в 90 раз, повысить эффективность интегрированной системы охраны отдельной пограничной заставы (поста) не менее чем в три раза за счет повышения вероятности обнаружения «реального» нарушителя государственной границы.

### References

1. Mikhniionok E. I. (2020) Method of Image Processing in the Problem of Detecting Moving Objects in Optical-Electronic Surveillance Systems of Thermal Imaging Type. *Doklady BGUIR = Doklady BSUIR*. 18 (2), 96–104. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-96-104> (in Russian).
2. Mikhniionok E. I., Khizniak A. V. (2022) Features of the Application of the Detection Algorithm Based on the Background Subtraction Method in the Scanning Optoelectronic Surveillance System. *Doklady BGUIR = Doklady BSUIR*. 20 (6), 30–36. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-30-36> (in Russian).
3. Mikhniionok E. I., Khizniak A. V. (2022) Evaluating the Effectiveness of Image Processing in the Task of Detecting Moving Objects by an Optoelectronic Surveillance System. *Doklady BGUIR = Doklady BSUIR*. 20 (4), 29–35. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-29-35> (in Russian).
4. Mikhniionok E. I., Khizniak A. V. (2019) An Approach to Assessing the Effectiveness of Technical Means Used to Solve the Tasks of Protecting the State Border]. *Proceedings of the Francisk Scorina Gomel State University. Natural Sciences*. 3 (114), 112–116 (in Russian).
5. Mikhniionok E. I., Khizniak A. V. (2022) Evaluation of the Effectiveness of Technical Means of the Integrated System of State Border Protection. *Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*. 3 (76), 31–37 (in Russian).

### **Вклад авторов**

Хижняк А. В. осуществил постановку задачи для проведения исследования.

Михнёнок Е. И. разработал аппаратно-программный комплекс, оценил эффективность его применения, провел его испытания.

### **Authors' contribution**

Khizniak A. V. formulated the task for the research.

Mikhniionok E. I. developed a hardware and software complex, evaluated the effectiveness of its application, conducted its tests.

### **Сведения об авторах**

**Михнёнок Е. И.**, начальник 2 группы научно-исследовательской лаборатории факультета связи и автоматизированных систем управления Военной академии Республики Беларусь

**Хижняк А. В.**, к. т. н., доцент, ведущий научный сотрудник 2 группы научно-исследовательской лаборатории факультета связи и автоматизированных систем управления Военной академии Республики Беларусь

### **Адрес для корреспонденции**

220057, Республика Беларусь,  
г. Минск, пр. Независимости, 220  
Военная академия Республики Беларусь  
Тел.: +375 29 291-27-36  
E-mail: actosum@gmail.com  
Михнёнок Евгений Игоревич

### **Information about the authors**

**Mikhniionok E. I.**, Head of the 2<sup>nd</sup> Group of the Research Laboratory of the Department of Communications and Automated Control Systems of the Military Academy of the Republic of Belarus

**Khizniak A. V.**, Cand. of Sci., Professor Assistant, Senior Researcher of the 2<sup>nd</sup> Group of the Research Laboratory of the Department of Communications and Automated Control Systems of the Military Academy of the Republic of Belarus

### **Address for correspondence**

220057, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosti Ave., 220  
Military Academy of the Republic of Belarus  
Tel.: +375 29 291-27-36  
E-mail: actosum@gmail.com  
Mikhniionok Evgeny Igorevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-77-85>

Original paper

UDC 621.384.3

## DESIGN AND PERFORMANCE OF AMORPHOUS SILICON BASED ON UNCOOLED BOLOMETER-TYPE INFRARED FOCAL PLANE ARRAYS

TRAN VAN TRIEU<sup>1</sup>, VIKTOR R. STEMPIITSKY<sup>1</sup>, IVAN YU. LOVSHENKO<sup>1</sup>,  
KIRILL V. KORSAK<sup>1</sup>, DAO DINH HA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup>Le Quy Don University of Science and Technology (Hanoi, Vietnam)

Submitted 30.01.2023

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023

**Abstract:** Uncooled bolometric type thermal detectors, combined into a matrix and placed into a focal plane array have the following characteristics: low cost, operation at room temperature, compatibility with the silicon CMOS technology, and high detecting performance; therefore recently it became a hot spot in infrared or terahertz detection field. The performance of uncooled infrared focal plane detector arrays depends on the optimization of critical parameters which are determined by geometrical design and the electrical, optical, and thermal physical properties of the detector materials. We report the study of a fabrication process and characterization of two (2D) dimensional arrays of uncooled microbolometers based on silicon ( $\alpha$ -Si) thermo-sensing films. Because these arrays substantially reduce sensor size, they are becoming the preferred format for most modern applications.

**Keywords:** detector, uncooled microbolometer, infrared detector, thermo-sensing, amorphous silicon, modeling.

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

**Gratitude.** The research was carried out with financial support and as part of solving the tasks of assignment 3.3 of the State research program “Photonics and electronics for innovation” along with JSC “INTEGRAL” – manager holding company “INTEGRAL”. The authors express their gratitude to Vladimir Kolos for his help in preparing this paper.

**For citation.** Tran Van Trieu, Stempitsky V. R., Lovshenko I. Yu., Korsak K. V., Dao Dinh Ha (2023) Design and Performance of Amorphous Silicon Based on Uncooled Bolometer-Type Infrared Focal Plane Arrays. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 77–85. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-77-85>.

## КОНСТРУКЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ БОЛОМЕТРИЧЕСКИХ ИНФРАКРАСНЫХ РЕШЕТОК НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

ЧАН ВАН ЧИЕУ<sup>1</sup>, В. Р. СТЕМПИЦКИЙ<sup>1</sup>, И. Ю. ЛОВШЕНКО<sup>1</sup>,  
К. В. КОРСАК<sup>1</sup>, ДАО ДИНЬ ХА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Вьетнамский государственный технический университет имени Ле Куи Дона (Ханой, Вьетнам)

Поступила в редакцию 30.01.2023

**Аннотация.** Неохлаждаемые тепловые детекторы болометрического типа, объединенные в матрицу, размещенную в фокальной плоскости, в последнее время активно применяются в инфракрасном или терагерцовом поле обнаружения, поскольку обладают низкой стоимостью и высокой эффективностью обнаружения, совместимы с кремниевой КМОП-технологией, а также работают при комнатной температуре. Характеристики таких детекторов зависят от оптимизации критических параметров, которые определяются геометрической конструкцией, электрическими, оптическими и тепловыми свойствами применяе-

мых материалов. В статье рассмотрены эксплуатационные характеристики пикселей двумерных массивов неохлаждаемых микроболометров на основе термочувствительных пленок аморфного кремния. Поскольку эти массивы значительно уменьшают размер сенсора, они становятся предпочтительным форматом для большинства современных приложений.

**Ключевые слова:** детектор, неохлаждаемый микроболометр, инфракрасный детектор, термодатчик, аморфный кремний, моделирование.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Исследования выполнены при финансовой поддержке и в рамках решения задач задания 3.3 Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» совместно с ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». Авторы выражают благодарность Владимиру Колосу за помощь в подготовке статьи.

**Для цитирования.** Конструкция и характеристики неохлаждаемых болометрических инфракрасных решеток на основе аморфного кремния / Чан Ван Чиеу [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 2. С. 77–85. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-77-85>.

## Introduction

Infrared (IR) detectors can be divided into two groups: the photon type and the thermal type. Uncooled thermal detectors have several advantages over photon detectors in that an uncooled IR camera is compact, light-weight, inexpensive, and reliable, and it hardly needs any maintenance. Their main shortcomings are lower sensitivity and longer response time. However, both of these problems have almost been solved, with the advent of surface micromachining technology as well as reliable deposition techniques for thin films. Micromachining technology offers the fabrication of good thermal isolation structures, e. g., a micro bridge structure. IR technology has been widely investigated but still it is an important field of study, while trying to satisfy the need of low cost and high-performance IR imaging systems. Microbolometer based on micro bridge structure has characteristics of low power, low cost, working at room temperature, high reliability and high detecting performance which is widely used in military and civilian fields [1–3].

There are mainly two kinds of microbolometers currently depending on whether the thermal sensitive material is vanadium oxide ( $\text{VO}_x$ ) or  $\alpha$ -Si [4].  $\text{VO}_x$ , polycrystalline silicon, germanium and hydrogenated  $\alpha$ -Si are materials commonly employed for microbolometer sensors [5–7]. Among available sensor materials,  $\alpha$ -Si has been widely utilized for its good temperature coefficient of resistance (TCR), mechanical strength, low thermal mass, and high manufacturing yield, as well as full compatibility with the CMOS processes. Those features enable shrinking pixel size which results in several technological advances as: larger format arrays, smaller and cheaper optical systems and packages [8]. In this article, the Coventor software was used to calculate design and fabrication bolometer based on micro-bridge for IR detecting. For IR detecting, micro bridge structure based on  $16 \times 16 \mu\text{m}^2$   $\alpha$ -Si thermo-sensing films was designed and fabricated.

## Approach, design, and fabrication

Technical evolution of the microbolometer is occurring in various fields such as pixel design, IR optics, and packaging [9]. Main motivations driving this evolution are to reduce cost and to increase integration. Normal structure of the microbolometer consists of one suspended multi-layer membrane and long supporting legs. The membrane, including dielectric material layer, thermal sensitive material layer, electrode layer and absorption layer, can absorb incident infrared radiation and cause multi-layer film membrane temperature change of the micro-bridge. A microbolometer requires an active material with high TCR, which means that small changes in the temperature of the thermo-sensing material translate into large changes in resistance. Low electrical resistivity is required in order to obtain minimized Johnson noise and good compatibility of the detector with the read-out circuitry, thus increasing the signal-to-noise ratio [10]. In general, an infrared detector generates temperature changes by absorbing infrared light from the external environment and converts those changes into an electrical signal, so the infrared absorption structure plays an important role in enhancing detector sensitivity. Minimization of mechanical deformation in unit pixels is important to maintain the optically resonant cavity structure and electrical uniformity through the membrane. There are three mechanisms of heat transfer that occur in a thermal detector, such as:

- 1) conduction mechanisms, which occur when the heat flows from the thermo-sensing area along the supporting legs to the substrate;
- 2) convection which occurs when the heat flows in the presence of a surrounding atmosphere; this mechanism is not very important if the detector is encapsulated in a vacuum package;
- 3) radiation mechanism is presented by the fact that the detector radiates energy back to its surroundings and the surroundings radiate back to it.

When the microbolometers are encapsulated in an evacuated package, with an IR transmitting window, convection and radiation mechanism are minimized. Thus, the main heat loss mechanism is the conduction from the thermo-sensing material to the substrate through the supporting structure. The supporting structure is a very important part of thermal detectors, it provides three functions: mechanical support, electrical conducting path and thermal conducting path. The development of arrays of uncooled IR sensors depends on the ability to form thermal isolation structures which should be compact, robust, and easy to fabricate. MEMS technology greatly contributed to the reduction of thermal conductance and sensitivity improvement. The value of output electric signal is related to the tiny temperature change of membrane. According to the detector operating at vacuum and room temperature conditions, thermal convection and thermal radiation could be ignored in the calculation process, so the thermal conductance ( $G$ ) of microbolometer is the total thermal conduction between a bolometer and its surrounding and it can be estimated by

$$G = G_{leg-conduction} + G_{radiation} + G_{gas-conduction} + G_{convection}, \quad (1)$$

where  $G_{leg-conduction}$ ,  $G_{radiation}$  is the thermal conduction between the bolometer and its surrounding through the bolometer legs and by emitted heat radiation;  $G_{gas-conduction}$ ,  $G_{convection}$  is the thermal conduction between the bolometer and its surrounding through the gas and by gas convection.

According to the detector operating at vacuum and room temperature condition, thermal convection and thermal radiation could be ignored in the calculation process, so the thermal conductance  $G$  of microbolometer is

$$G \approx 2G_{leg} = 2k \frac{wd}{l}, \quad (2)$$

where  $G_{leg}$  is the thermal conductance of micro-bridge leg;  $k$  is thermal conductivity of the supporting leg;  $w$ ,  $d$ ,  $l$  are the width, thickness, and length of the leg, respectively.

Thermal capacity  $C$  of the membrane can be expressed as

$$C = \sum V_i \rho_i c_i, \quad (3)$$

where  $V_i$ ,  $\rho_i$ ,  $c_i$  are the volume, density and specific heat capacity of the multi-layer thin film in the membrane.

The response time  $\tau$  of micro-bridge can be calculated with thermal conductance and thermal capacity

$$\tau = \frac{C}{G}. \quad (4)$$

The response time is related to the working frequency. And then the other parameters can be calculated according to the requirement of the response time. The relative TCR is defined as

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}. \quad (5)$$

The change of voltage of a constant current-biased bolometer is

$$\Delta V = I \Delta R = IR \alpha \Delta T. \quad (6)$$

Performance of microbolometers is evaluated through voltage responsivity  $R_v$ , noise, and directivity. Voltage responsivity is the output signal generated per unit of incident power, expressed by

$$R_v = \frac{\eta \beta I \alpha R_{ef}}{G_{th} \sqrt{1 + \omega^2 \tau_{th}^2}}, \quad (7)$$

where  $\eta$  is absorption coefficient;  $\beta$  is the fill factor;  $I$  is the bias current;  $\alpha$  is the TCR of the thermo-sensing film;  $R_{ef}$  stands for an effective resistance resulting from the equivalent parallel resistance between

bolometer and readout circuit impedance;  $G_{th}$  is the thermal conductance;  $\omega$  is the angular frequency of the signal modulation;  $\tau_{th}$  is the thermal time constant (also called response time).

$R_v$  can also be determined by the formula

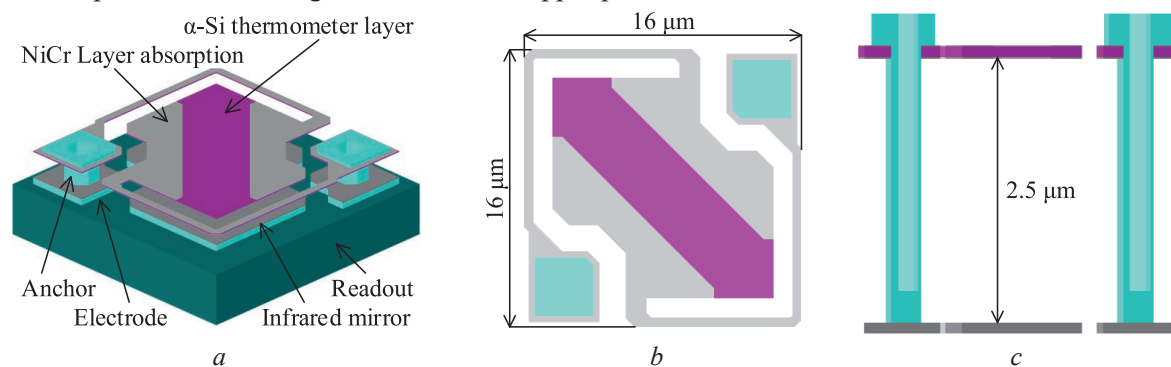
$$R_v = \frac{\Delta V}{P_{in}}, \quad (8)$$

where  $\Delta V$  is the voltage difference from dark to infrared;  $P_{in}$  is the infrared power.

To provide a high absorption of the radiation in the bolometer membrane, conventional bolometers contain resonant optical cavity (Fabry-Perot) structures that are optimized for the targeted wavelength. The most commonly used resonant optical cavity design, in which the infrared mirror (typically aluminum) of the resonant optical cavity is placed on the surface of the underlying substrate (the ROIC) and the bolometer membrane is placed at the distance  $d$  of  $\lambda/4$  from the mirror surface on the substrate. Thus, a high fraction of the incident infrared radiation at a specific wavelength  $\lambda$  is absorbed in the bolometer membrane [11]. For a targeted wavelength interval of 8 to 14  $\mu\text{m}$ , the distance between the bolometer membrane and the mirror on the substrate is typically about 2 to 2.5  $\mu\text{m}$  [11, 12]. During a system-level simulation, all of the above parameters should be considered.

### Examples of fabricated detectors and arrays

The pixel is divided into two parts (Fig. 1), a silicon (Si) readout integrated circuit in the lower part and a suspended micro bridge structure in the upper part.



**Fig. 1.** Structure of the microbolometer pixel: *a* – 3D model; *b* – top view; *c* – cross-section

The bolometer is composed of a thermometer integrated on a micro-bridge. This micro-bridge is supported by two legs anchored over the silicon substrate by metal studs. This micro-bridge is built on a sacrificial layer which is removed in a final step. The distance between the ROIC and the micro-bridge is 2.5  $\mu\text{m}$ . This vacuum gap works as a quarter wavelength cavity, which sets the detector spectral response maximum at a wavelength close to 10  $\mu\text{m}$ . The active region of the sensor consists of the IR absorber layer, made of NiCr, which absorbs incident radiation, and an underlying thermometer layer, comprised of  $\alpha$ -Si, whose sheet resistance will vary as a function of the temperature change induced by the absorption of radiation by the NiCr layer. Considered structure has a pixel step is 16  $\mu\text{m}$ , NiCr supporting legs width is 1  $\mu\text{m}$ ,  $\alpha$ -Si and NiCr film thickness is 0.1  $\mu\text{m}$  and 15 nm accordingly. Active area of pixel is 197  $\mu\text{m}^2$ . The Tab. 1 shows the parameters of the materials used in modeling.

**Table 1.** Material properties of microbolometer

Material	Elastic constants (Elastic-Iso)		Density, $\text{kg}/\mu\text{m}^3$	Stress (MPa) – AnIso			Thermal conduction $G$ , $\text{pW}/(\mu\text{m}\cdot\text{K})$	Specific heat $C$ , $\text{pJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Electric conduction, $\text{pS}/\mu\text{m}$
	$E$ , MPa	Poisson		$S_x$	$S_y$	$S_z$			
Al	$7.7 \cdot 10^4$	0.3	$2.3 \cdot 10^{-15}$	24	14	0	$2.37 \cdot 10^8$	$8.98 \cdot 10^{14}$	$3.69 \cdot 10^{13}$
NiCr	$1.0 \cdot 10^4$	0.2	$4.6 \cdot 10^{-15}$	-160	-160	0	$2.08 \cdot 10^7$	$5.0 \cdot 10^{14}$	$2.83 \cdot 10^{12}$
$\alpha$ -Si	$8.0 \cdot 10^4$	0.3	$2.26 \cdot 10^{-15}$	17	17	0	$1.0 \cdot 10^6$	$6.81 \cdot 10^{14}$	Variable value

Besides its silicon technology compatibility,  $\alpha$ -Si presents many other advantages. First, it enables the manufacturing of very thin suspended membranes combined with short leg lengths resulting in high fill factor and high mechanical strength structures that could sustain high vibration rates and high mechanical shocks. This reduced mechanical susceptibility to vibration or shock solicitation is obviously



important for a number of military as well as commercial applications. Secondly, the very thin thermally isolated suspended membrane, along with the low thermal mass of silicon, results in a very low pixel thermal time constant. Finally, this simple technology leads to high manufacturing yield and therefore low manufacturing cost.

### Results and discussions

Minimizing heat loss mechanisms is essential to maximizing sensitivity. The dominant heat loss mechanism is heat conduction through the support structure to the underlying substrate. The total thermal conductance  $G$  can be determined by means of a steady-state thermal analysis in which a constant power input is supplied via a heat flux surface boundary condition.  $G$  is the ratio of the total power supplied and the maximum temperature change achieved by the sensor. Fig. 2 shows the calculation model of thermal conductance.

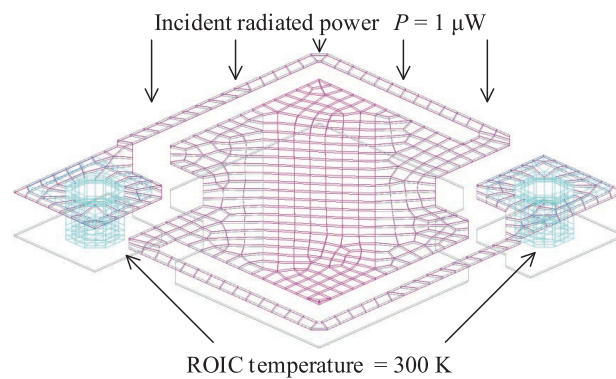


Fig. 2. The calculation model of thermal conductance

Results calculated by Coventor software

$$G = \frac{\text{Input Power}}{\Delta T} = 9.84 \cdot 10^{-8} \text{ W/K.}$$

The time constant,  $\tau$ , provides measurement of the response time of the sensor;  $\tau$  needs to be sufficiently low to satisfy the application requirements of the microbolometer. The time constant can be determined from a transient thermal analysis by examining the temperature response of the sensor as a function of time upon cooling down from the maximum steady-state temperature computed from the previous analysis. The time constant can be determined from a transient thermal analysis by examining the temperature response of the sensor as a function of time upon cooling down from initial ROIC temperature of 310 to 300 K (Fig. 3). The time constant  $\tau = 380 \mu\text{s}$ . With both  $G$  and  $\tau$  known,  $C$  the total heat capacity can be calculated using equation (3):

$$C = G\tau = 9.84 \cdot 10^{-8} \cdot 0.38 \cdot 10^{-3} = 3.74 \cdot 10^{-11} \text{ J/K.}$$

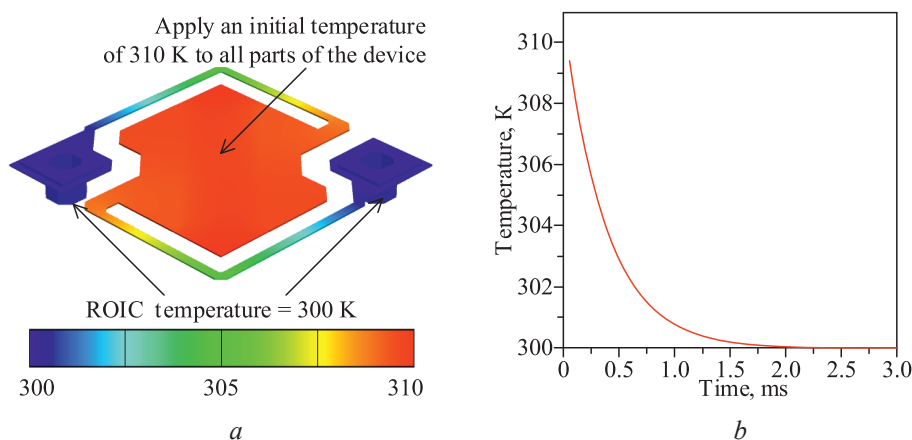


Fig. 3. The calculation model of time constant (a) and the time constant of microbolometer (b)

During operation, a bias voltage signal is applied across the sensor, inducing a current through the thermometer layer, which depends on the temperature-dependent resistance that changes as incident radiation is absorbed. Thus, in addition to the fundamental thermal design parameters previously discussed, comprehending the response of the sensor to an applied voltage is essential. The static voltage-temperature ( $V-T$ ) curve allows designers to understand the effect of Joule heating on the microbolometer and to determine the temperature gain of the microbolometer at steady state when a given potential is applied across it. Understanding the steady-state current-voltage ( $I-V$ ) curve, whose slope is the resistance of the microbolometer, is important as the resistance contributes to the sensitivity of the device. A single, steady-state electrothermal analysis is used to generate both the  $I-V$  and  $V-T$  curves by sweeping the applied voltage from  $-2$  to  $2$  V in steps of  $0.1$  V, applied across the microbolometer anchor surfaces (Fig. 4). Fig. 4, *a* illustrates how the static temperature of the device will vary due to a constant voltage drop across the resistive sensor and the current that is induced in the resistive sensor at each applied voltage plot the resistance as a function of temperature.

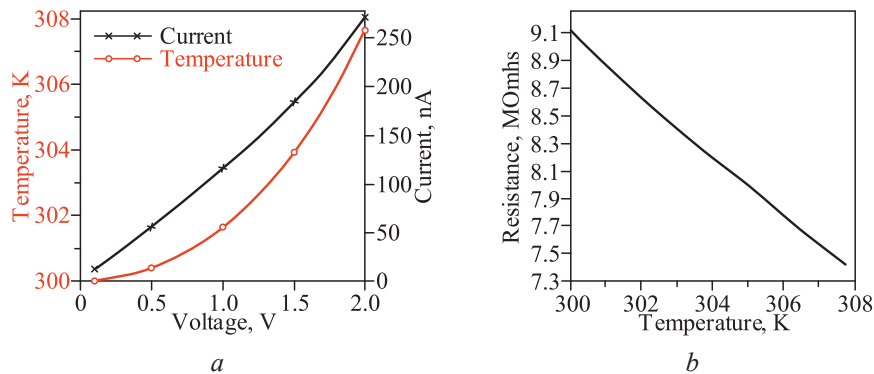


Fig. 4. Illustrates curvature properties

From Fig. 4, *b* it allows to calculate the  $\alpha$ , used in equation (5). As shown above, resistance changes quite linearly with temperature. The linear relationship between resistance and temperature allows us to use the value of the  $\alpha \approx -0.028$ .

In addition to the thermal and electrical properties examined so far, understanding the mechanical stiffness of the sensor is essential. Microbolometers are designed to stand exactly a quarter wavelength of the incident IR radiation from the substrate. This design specification is required because some radiation passes through the sensor, reflects from the substrate, and impinges on the back of the sensor. A gap of a quarter wavelength maximizes the superposition of the reflected wave with the initial wave, thus maximizing absorption by the sensor. Deformation can cause the sensor to deviate from this specification. Deformation results when the mechanical stiffness of the device is balanced against the resolution of residual stresses from fabrication, as well as elevated temperatures causing the sandwiched layers comprising the sensor to expand and contract differently, which is caused by varying coefficients of thermal expansion. The flatness of the sensor can be assessed by a steady-state mechanical analysis. Using the grid model (Fig. 5) there is the run a coupled thermomechanical analysis. A coupled thermomechanical analysis will capture the effects of thermal expansion/contraction in addition to the deformation due the pre-stresses.

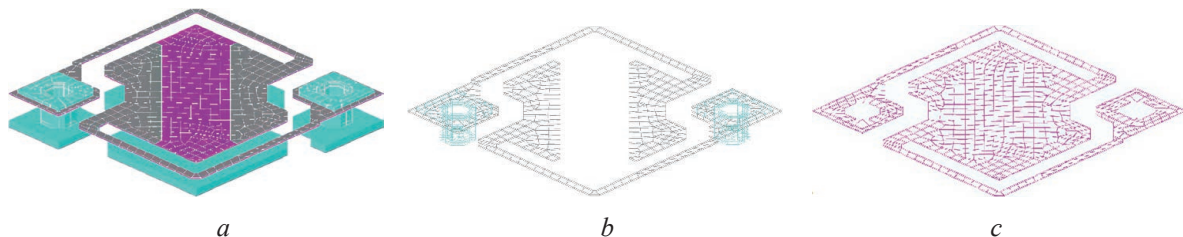


Fig. 5. The mesh model of microbolometer: *a* – 3D mesh model; *b* – electrode Al and NiCr layer; *c* –  $\alpha$ -Si resistance layer

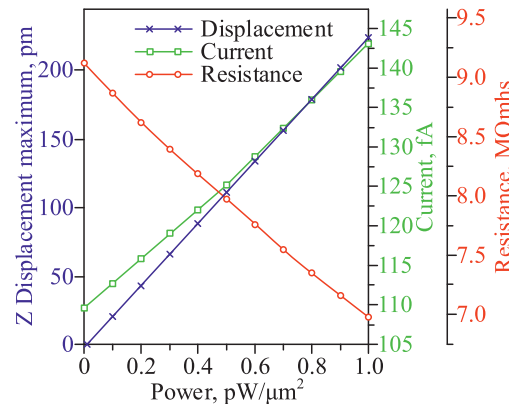
The results show that the highest and lowest elevations of the IR absorbing layer differ by nearly 3 nm across the pixel. This result ensures the maintenance of the superposition of the reflected wave with the initial wave. Applying equation (7) with assumed values required to determine responsivity

includes: bias current  $I = 10^{-6}$  A is arbitrarily chosen as a representative bias current;  $\omega$  – the angular frequency of modulation of the radiation, is assumed to be 60 Hz;  $\eta$  – the absorbance of the IR sensitive layer, is the product of the absorption of the NiCr,  $\alpha$ -Si layer and the fill factor of the sensor, taken as 0.9 and 0.77, respectively. So, value of sensitivity is equal to  $R_v = 2.33 \cdot 10^6$  V/W. In summary, the microbolometer parameters are presented in Tab. 2.

**Table 2.** Results of survey of the parameters of the above designed bolometer

Design parameter	Value
Thermal conductance $G$ , W/K	$9.84 \cdot 10^{-8}$
Thermal time constant $\tau$ , s	$0.38 \cdot 10^{-3}$
Specific heat $C$ , J/K	$3.74 \cdot 10^{-11}$
Resistance $R$ (for 300 K), Omhs	$9.11 \cdot 10^6$
Thermal coefficient of resistance (TCR), 1/K	-0.028
Maximum deflection (for 300 K), $\mu\text{m}$	0.003
Fill factor of the sensor $\beta$	0.77
Responsivity $R_v$ , V/W	$2.33 \cdot 10^6$

Simulating the operation of a microbolometer requires analyzing multiple coupled physical domains. Incident radiation absorption causes a temperature increase, which mechanically deforms the device, but also changes the resistance of the thermometer layer. The change in the resistance is detected by means of the output current through or voltage drop across the microbolometer, which is incorporated into an integrated circuit. Thus, coupling between mechanical, electrical, and thermal domains is required. Next, we need to conduct a steady-state electro-thermomechanical simulation. To do this, a power supply with a voltage of 1  $\mu\text{V}$  is connected to the one of the electrodes of the bolometer, and the power of the incident voltage varies from 0 to 1  $\text{pW}/\mu\text{m}^2$ . Fig. 6 shows the change in mechanical deformation, resistance, and current through the microbolometer as the input radiated power increases.



**Fig. 6.** The mechanical deformation, resistance, and current of the microbolometer as the input incident radiated power increases

Microbolometers operate under a voltage bias, thus allowing for the detection of output current, which is a function of the sensor resistance. However, the application of this voltage signal induces Joule heating, which should be understood independently of the temperature increase due to the absorbed IR radiation. Given that the voltage signal will be time-dependent, we will run a transient electrothermal simulation to predict the thermal response of the microbolometer to an input voltage pulse. The voltage profile that will be applied to the device is shown in Fig. 7, *a*. The voltage pulse applies a bias of 1 V, transition time 40  $\mu\text{s}$ , the duration designed to allow the sensor temperature to ramp up to the steady-state value predicted in accordance with the thermal time constant inherent to the device.

The plot fig. 7, *b* shows that the device reaches a maximum temperature of 302.98 K due to the Joule heating induced by the voltage pulse. After the voltage signal is removed, the device temperature drops back to 300 K as the heat is lost to the substrate by conduction through the anchor surfaces. In practice, an electrical circuit is used to detect incident radiation that is absorbed by the microbolometer. When the microbolometer is exposed to incident radiation, the temperature increases and changes the resistance of the device. Simultaneously, in order to detect the change in resistance, the thermistor is pulsed by an electrical signal. Thus, the current induced to flow through the bolometer is the output of interest.

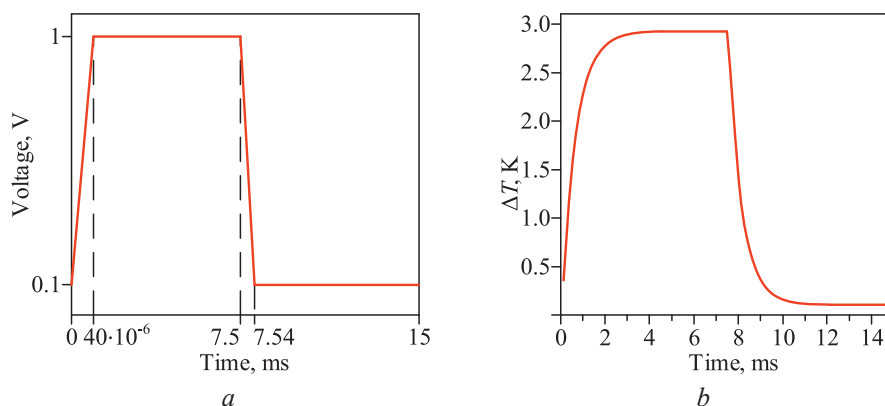


Fig. 7. Applied voltage profile for transient analysis (a) and dependence of temperature changes on time (b)

When the radiation abates and the bias voltage is removed, the sensor cools down with a characteristic time constant. The strategy employed here is pulsed biasing, in which the detector bias is applied only for a short period of time. Pulse biasing, as opposed to a continuous bias strategy, prevents possible damage to the pixels due to excessive joule heating as the self-heating is expected to be minimal. The applied voltage and heat flux input profile is shown in Fig. 8, a.

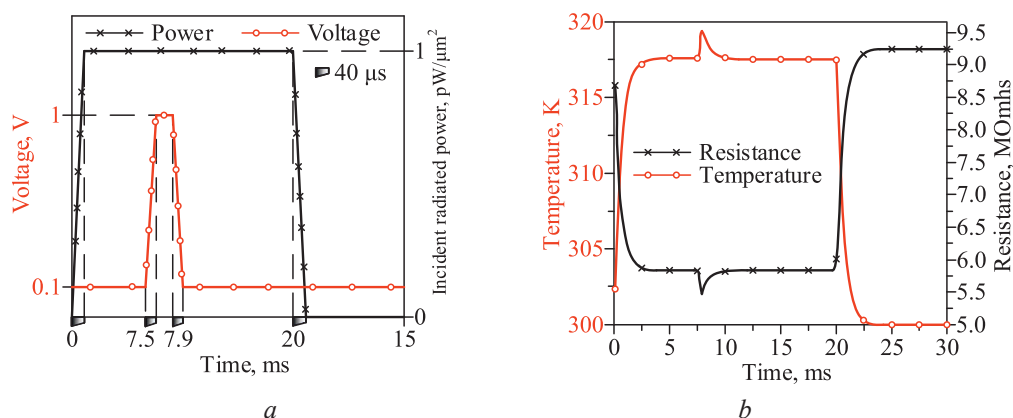


Fig. 8. Applied voltage and heat flux profiles for transient analysis (a) and dependence of temperature and microbolometer resistance on time (b)

The plot Fig. 8, b shows that the microbolometer first responds to the heat flux boundary condition, mimicking the power input from the absorption of radiation impinging the sensor. The temperature of the bolometer increases to a steady value of 317.5 K. The short voltage pulse is then applied after the sensor, temperature stabilizes from the heat input, and the temperature increases momentarily due to Joule heating, achieving a maximum temperature of 319.5 K. Once the voltage is turned off and the contribution from Joule heating is removed, the temperature drops to the local maximum corresponding to only the heat flux input. When heat flux is turned off, the temperature drops to 300 K, as defined by the heat sink. The plot Fig. 8, b shows that as the temperature of the sensor increases, the resistance decreases. This is consistent with the electrical conductivity values supplied for the α-Si thermistor layer. The impact on the resistance due to Joule heating is evident at 7.5 ms when the voltage pulse is applied. The difference in resistance between the quasi-steady-state value due to the temperature increase from the incidence radiation and the additional resistance due to self-heating represents an error in the measurements and should be minimized.

## Conclusions

Mechanical robustness of focal plane area is very important to maintain infrared absorption performance as the microbolometer pixel size is decreased. In this paper, new structures have been designed and characterized to determine the influence of geometry on the characteristic parameters of a bolometer. The width and length of the support arm greatly affects the thermal conductivity of the device. The deformation of the device is controlled by a number of NiCr absorption layers and the thickness of the thermoelectric material. In conclusion, mechanical robustness of focal plane array related

to the infrared absorbance can be implemented by optimization of residual stress and alignment accuracy of each layer constituting the focal plane array. By the optimization of the fabrication process, we obtained a focal plane array with good mechanical robustness. This shows that the proposed pixel design is very useful for most applications.

## References

1. Wood R. A., Han C. J., Kruse P. W. (1992) Integrated Uncooled Infrared Detector Imaging Arrays. *Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 5<sup>th</sup> Technical Digest. IEEE*. 132–135.
2. Takamuro Daisuke, Tomohiro Maegawa, Takaki Sugino (2011) Development of New SOI Diode Structure for Beyond 17  $\mu\text{m}$  Pixel Pitch SOI Diode Uncooled IRFPAs. *Proceedings of SPIE – the International Society for Optical Engineering*. 8012, 80121E.
3. Li C., Han C. J., Skidmore G. D., Hess. C. (2010) DRS Uncooled  $\text{VO}_x$  Infrared Detector Development and Production Status. *Proc SPIE*. 7660, 76600V.
4. Biao Li (2004) Design and Simulation of an Uncooled Double-Cantilever Microbolometer with the Potential for  $\sim$  mK NETD. *Sensor and Actuators A: Physical*. 112 (2), 351–359.
5. Sedky S., Fiorini P., Caymax M., Agnes V., Baert C. (1998) IR Bolometers Made of Polycrystalline Silicon Germanium. *Sensors and Actuators A*. 66 (1–3), 193–199.
6. Heredia-J. A., Torres-J. A., De la Hidalgo-W. F. J., Jaramillo-N. A. (2002) A Boron Doped Amorphous Silicon Thin-Film Bolometer for Long Wavelength Detection. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* (744), M5.26.1–M5.26.6.
7. Kosarev A., Moreno M., Torres A., Zuñiga C. (2008) IR Sensors Based on Silicon–Germanium–Boron Alloys Deposited by Plasma: Fabrication and Characterization. *J. of Non-Crystalline Solids*. 354 (19–25), 2561–2564.
8. Tisse C.-L., Tissot J.-L., Crastes A. (2012) An Information-Theoretic Perspective on the Challenges and Advances in the Race Toward 12  $\mu\text{m}$  Pixel Pitch Megapixel Uncooled Infrared Imaging. *Proceedings of the SPIE*. 8353.
9. Hee Yeom Kim, Kyoung Min Kim, Byeong Il Kim et al. (2011) Mechanical Robustness of FPA in a-Si Microbolometer with Fine Pitch. *Sensors & Transducers Journal* (11), 56–63.
10. Abbasi S., Shafique A., Ceylan O., Kaynak C. B., Kaynak M., Gurbuz Y. (2018) A Test Platform for the Noise Characterization of SiGe Microbolometer ROICs. *IEEE Sensors Journal* (18), 6217.
11. Mottin E., Bain A., Martin J. L., Ouvrier-Buffet J. L., Bisotto S., Yon J. J., Tissot J. L. (2003) Uncooled Amorphous Silicon Technology Enhancement for 25  $\mu\text{m}$  Pixel Pitch Achievement. *Proceedings of the SPIE*. 4820, 200–207.
12. Murphy D., Ray M., Wyles J., Asbrock J., Hewitt C., Wyles R., Gordon E., Sessler T., Kennedy A., Baur S., Van Lue D. (2004) Performance Improvements for  $\text{VO}_x$  Microbolometer FPAs. *Proceedings of the SPIE*. 5406, 531–540.

## Authors' contribution

Tran Van Trieu analyzed the existing design solutions and conducted a simulation of the operational characteristics of the microbolometer.

Stempitsky V. R. established the task for the research, prepared the manuscript of the article.

Lovshenko I. Yu. interpreted the simulation results, prepared the manuscript of the article.

Korsak K. V. analyzed the design solutions used for the MEMS microbolometers.

Dao Dinh Ha performed a simulation of the operational characteristics of the microbolometer.

## Information about the authors

**Tran Van Trieu**, Postgraduate of Micro- and Nanoelectronics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; **Stempitsky V. R.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, Adviser of Laboratory “CAD in Micro- and Nanoelectronics” at the Research Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; **Lovshenko I. Yu.**, Head of the Research Laboratory “CAD in Micro- and Nanoelectronics” at the Research Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; **Korsak K. V.**, Master’s Student at the Micro- and Nanoelectronics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; **Dao Dinh Ha**, Cand. of Sci. of the Le Quy Don University of Science and Technology.

## Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-88-90  
E-mail: lovshenko@bsuir.by  
Lovshenko Ivan Yur’evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-86-94>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 004.415.533

## СВОЙСТВА МЕРЫ РАЗЛИЧИЯ ДВОИЧНЫХ ТЕСТОВЫХ НАБОРОВ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ТЕСТОВ

В. Н. ЯРМОЛИК, В. В. ПЕТРОВСКАЯ, А. А. ИВАНЮК

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

Поступила в редакцию 23.11.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Исследуется задача применения характеристик различия для двоичных тестовых последовательностей. Обосновывается их актуальность при генерировании управляемых вероятностных тестов. Рассматривается мера различия  $AD(T_i, T_k)$  между тестовыми наборами  $T_i$  и  $T_k$ , использующая характеристику расстояния  $D(t_{i,j}, t_{k,r})$  между  $t_{i,j}$  и  $t_{k,r}$ , которая основана на определении независимых пар тождественных данных  $t_{i,j} = t_{k,r}$ , принадлежащих двум наборам  $T_i$  и  $T_k$ . Данная мера различия  $AD(T_i, T_k)$  позволяет оценить степень различия двух тестовых наборов  $T_i$  и  $T_k$ , которые могут быть неразличимыми при использовании других мер различия, в том числе и расстояния Хэмминга. Получены верхние и нижние оценки меры различия для случая инверсных тестовых наборов и произвольных тестовых наборов  $T_i$  и  $T_k$  с различным сочетанием их весов  $w_i$  и  $w_k$ . Приводятся примеры вычисления граничных значений указанной меры различия и соотношения их значений. Экспериментальные результаты подтверждают корректность полученных граничных значений указанной меры различия  $AD(T_i, T_k)$  и показывают возможность их применения для ее оценки.

**Ключевые слова:** мера различия, расстояние Хэмминга, расстояние Левенштейна, тест, тестовый набор, управляемые вероятностные тесты.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Ярмолик, В. Н. Свойства меры различия двоичных тестовых наборов управляемых вероятностных тестов / В. Н. Ярмолик, В. В. Петровская, А. А. Иванюк // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 2. С. 86–94. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-86-94>.

## DISSIMILARITY MEASURE PROPERTIES OF BINARY TEST PATTERNS OF CONTROLLED RANDOM TESTS

VYACHESLAV N. YARMOLIK, VITA V. PETROVSKAYA, ALEXANDER A. IVANIUK

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

Submitted 23.11.2022

**Abstract.** The problem of application of the dissimilarity measures for binary test sequences is investigated. Their relevance in generating controlled random tests is substantiated. Dissimilarity measure  $AD(T_i, T_k)$  between test sets  $T_i$  and  $T_k$  is considered, using the characteristic of the distance  $D(t_{i,j}, t_{k,r})$  between  $t_{i,j}$  and  $t_{k,r}$ , which is based on the determination of independent pairs of identical data  $t_{i,j} = t_{k,r}$  belonging to two patterns  $T_i$  and  $T_k$ . This measure  $AD(T_i, T_k)$  allows us to estimate the degree of difference between two test sets  $T_i$  and  $T_k$ , which may be indistinguishable when using other difference measures, including the Hamming distance. Upper and lower estimates for the measurement of dissimilarity are obtained for the case of inverse test patterns and arbitrary test

patterns  $T_i$  and  $T_k$  with different combinations of their weights  $w_i$  and  $w_k$ . Examples of calculating the boundary values of the specified dissimilarity measure and the ratio of their values are given. Experimental results confirm the correctness of the obtained boundary values of the indicated dissimilarity measure  $AD(T_i, T_k)$  and show the possibility of their application for its evaluation.

**Keywords:** dissimilarity measure, Hamming distance, Levenshtein distance, test, test pattern, controlled random tests.

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

**For citation.** Yarmolik V. N., Petrovskaya V. V., Ivaniuk A. A. (2023) Dissimilarity Measure Properties of Binary Test Patterns of Controlled Random Tests. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 86–94. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-86-94> (in Russian).

## Введение

Основная задача управляемого вероятностного тестирования состоит в нахождении меры различия тестовых наборов, которая максимально полно показывает их отличие и характеризуется невысокой вычислительной сложностью [1–3]. Определение меры различия тестовых наборов, в общем случае представляющих собой символьные последовательности, в свою очередь, сводится к задаче их сравнения [4].

В [5] рассматривается мера различия (dissimilarity) конечных последовательностей  $T_i = t_{i,0}, t_{i,1}, \dots, t_{i,n-1}$  как объектов, представляющих упорядоченные тестовые наборы  $T_i$  из  $n$  данных (элементов) некоторого множества произвольной природы. Основой для построения меры различия  $AD(T_i, T_k)$  является характеристика интервала, используемая в теории строя, которая применяется для формального описания и анализа последовательностей данных (символов) для любого алфавита [6]. Данная характеристика интервала была использована для определения меры различия или степени несовпадения двух тестовых наборов, показывая их удаленность либо близость друг от друга [7]. В общем случае, для тестовых наборов  $T_i$  и  $T_k$ , каждый из которых состоит из  $n_i$  и  $n_k$  данных  $t_{i,j}, j \in \{0, 1, \dots, n_i - 1\}$ , и  $t_{k,r}, r \in \{0, 1, \dots, n_k - 1\}$ , интервалом для пары совпадающих данных  $t_{i,j} = t_{k,r}$  является значение расстояния  $D(t_{i,j}, t_{k,r})$  между  $t_{i,j}$  и  $t_{k,r}$ . Для вычисления величины расстояния  $D(t_{i,j}, t_{k,r})$  первоначально определяются значения  $|j - r|$  и  $\max(n_i, n_k) - |j - r|$ . Минимальное значение из приведенных величин принимается в качестве расстояния, т. е.  $D(t_{i,j}, t_{k,r}) = \min[|j - r|, \max(n_i, n_k) - |j - r|]$ . Для случая тестовых данных, когда  $n = n_i = n_k$ , расстояние  $D(t_{i,j}, t_{k,r})$  определяется соотношением  $\min[|j - r|, n - |j - r|]$ . Как отмечалось ранее, подобная оценка расстояния необходима для синтеза управляемых вероятностных тестов, когда очередной тестовый набор формируется максимально удаленным от ранее сгенерированных наборов. Формально эта характеристика, описанная в [7], для случая двоичных тестовых наборов одинаковой размерности  $n$  соответствует следующему определению.

**Определение 1.** Мера различия  $AD(T_i, T_k)$  тестовых наборов  $T_i$  и  $T_k$ , каждый из которых состоит из  $n$  данных  $t_{i,j}, t_{k,r} \in \{0, 1\}$ , где  $j, r \in \{0, 1, \dots, n - 1\}$ , основана на определении независимых пар одинаковых (тождественных) данных  $t_{i,j} = t_{k,r}$ , принадлежащих двум наборам. Независимость пар означает участие каждого значения данных  $t_{i,j}$  и  $t_{k,r}$  тестовых наборов  $T_i$  и  $T_k$  только в одной паре. Процедура формирования подобных пар носит комбинаторный характер и заключается в нахождении такого их сочетания, для которого сумма их расстояний  $D(t_{i,j}, t_{k,r})$  минимальна. При отсутствии пары для очередного значения данных  $t_{i,j}$  в наборе  $T_k$  разность величин индексов, т. е. расстояние  $D(t_{i,j}, -)$  принимает значение  $\lfloor n/2 \rfloor$ . Показано, что приведенная мера различия  $AD(T_i, T_k)$  тестовых наборов  $T_i$  и  $T_k$  удовлетворяет требованиям: тождественности ( $AD(T_i, T_k) = 0$ , если  $T_k = T_i$ ), неотрицательности ( $AD(T_i, T_k) \geq 0$ ) и симметричности ( $AD(T_i, T_k) = AD(T_k, T_i)$ ) [5, 8].

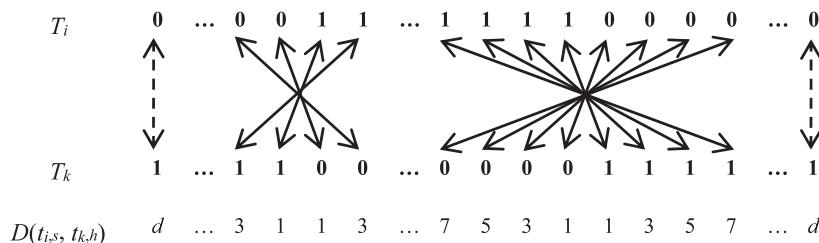
Согласно уточненному определению меры различия для случая двоичных данных одинаковой размерности, выделяется два подмножества пар данных [7]. К первому относятся пары совпадающих данных  $t_{i,j} = t_{k,r}$ , для которых стоит задача определения оптимального их распределения между парами для минимизации суммы расстояний между ними. Количество таких пар определяется соотношением  $Q_e = n + \min[w(T_i), w(T_k)] - \max[w(T_i), w(T_k)]$ , где  $w(T_i)$  является весом (количеством единиц) двоичного вектора  $T_i$ . Второе подмножество содержит  $Q_n = \max[w(T_i), w(T_k)] - \min[w(T_i), w(T_k)]$  произвольных пар несовпадающих данных  $t_{i,j} \neq t_{k,r}$ , для которых  $D(t_{i,j}, t_{k,r}) = \lfloor n/2 \rfloor$ . Для тестовых наборов  $T_i$  и  $T_k$  двоичных данных  $t_{i,j}$  и  $t_{k,r}$  справедливо следующее утверждение.

**Утверждение 1.** Для пары совпадающих данных  $t_{i,j} = t_{k,r}$  с расстоянием  $D(t_{i,j}, t_{k,r}) \neq 0$  всегда существует пара  $t_{i,r} = t_{k,j}$  данных с расстоянием  $D(t_{i,r}, t_{k,j}) = D(t_{i,j}, t_{k,r})$ . Справедливость данного утверждения следует из того, что если  $t_{i,j} = t_{k,r}$  образуют пару с  $D(t_{i,j}, t_{k,r}) \neq 0$ , то  $t_{i,j} \neq t_{k,j}$  и  $t_{i,r} \neq t_{k,r}$ . Соответственно при  $t_{i,j} = t_{k,r} = 0$  существует пара  $t_{k,j} = t_{i,r} = 1$ , либо, наоборот, при  $t_{i,j} = t_{k,r} = 1$  имеем пару  $t_{k,j} = t_{i,r} = 0$ .

Мера различия  $AD(T_i, T_k)$  позволяет оценить степень различия двух тестовых наборов  $T_i$  и  $T_k$ , которые могут быть неразличимыми при использовании других мер различия. В качестве иллюстрации данного утверждения рассмотрим пример двоичных наборов, второй  $T_k$  из которых является инверсией первого  $T_i$ . Для подобных наборов  $T_i$  и  $T_k = \bar{T}_i$  расстояние Хэмминга  $HD(T_i, \bar{T}_i)$  всегда неизменно и равняется  $n$ . В то же время характеристика  $AD(T_i, \bar{T}_i)$  принимает различные значения в зависимости от веса  $w(T_i)$  исходного набора  $T_i$ , а также от взаимного расположения в нем данных  $t_{i,0}, t_{i,1}, \dots, t_{i,n-1}$ , входящих в данный набор. Например, для случая двоичных данных, входящих в набор  $T_i$ , и различных значений веса  $w(T_i)$  характеристика  $AD(T_i, \bar{T}_i)$  принимает следующие значения:  $AD(10000000, 01111111) = 26$ ,  $AD(11000000, 00111111) = 20$ ,  $AD(11100000, 00011111) = 18$  и  $AD(11110000, 00001111) = 16$ . В качестве второго примера рассмотрим случай двоичных наборов той же размерности  $n = 8$ , когда первый набор  $T_i$  имеет постоянный вес, предположим,  $w(T_i) = 4$ . Соответственно имеем:  $AD(11110000, 00001111) = 16$ ,  $AD(11101000, 00010111) = 12$  и  $AD(11001100, 00110011) = 8$ . Расстояние Хэмминга во всех рассмотренных выше примерах равняется 8, что свидетельствует об одинаковом максимальном отличии всех рассмотренных пар наборов  $T_i, \bar{T}_i$  в терминах указанной меры различия.

**Мера различия  $AD(T_i, T_k)$  для инверсных тестовых наборов  $T_i$  и  $T_k = \bar{T}_i$**

Исследуем характеристику  $AD(T_i, \bar{T}_i)$  в зависимости от значения веса  $w(T_i)$ , представляющего собой количество единичных данных в исходном наборе  $T_i$ . Как иллюстрируют приведенные выше примеры, взаимное расположение данных в сильной мере влияет на величину характеристики  $AD(T_i, \bar{T}_i)$ . Первоначально рассмотрим исходный набор  $T_i$  с весом  $w = w(T_i) \leq \lfloor n/2 \rfloor$ , в котором все  $w$  единиц сгруппированы в виде одной серии. В общем виде набор  $T_i$  принимает вид  $T_i = t_{i,0}, \dots, t_{i,l-1}, t_{i,l}, t_{i,l+1}, t_{i,l+2}, \dots, t_{i,l+w-3}, t_{i,l+w-2}, t_{i,l+w-1}, t_{i,l+w}, t_{i,l+w+1}, t_{i,l+w+2}, \dots, t_{i,n-1} = 0 \dots 0 \ 0 \ 1 \ 1 \dots 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \dots 0$  и, соответственно,  $T_k = \bar{T}_i = t_{k,0}, \dots, t_{k,l-1}, t_{k,l}, t_{k,l+1}, t_{k,l+2}, \dots, t_{k,l+w-3}, t_{k,l+w-2}, t_{k,l+w-1}, t_{k,l+w}, t_{k,l+w+1}, t_{k,l+w+2}, \dots, t_{k,n-1} = 1 \dots 1 \ 1 \ 0 \ 0 \dots 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \dots 1$ . В соответствии с Определением 1 оптимальное сочетание пар совпадающих данных наборов  $T_i$  и  $T_k = \bar{T}_i$  для вычисления величины характеристики  $AD(T_i, T_k)$  имеет вид  $\{(t_{i,l+1}, t_{k,l}), (t_{i,l}, t_{k,l+1}), (t_{i,l+w}, t_{k,l+w+1}), (t_{i,l+w+1}, t_{k,l+w}), (t_{i,l+2}, t_{k,l-1}), (t_{i,l-1}, t_{k,l+2}), (t_{i,l+w-1}, t_{k,l+w+2}), (t_{i,l+w+2}, t_{k,l+w-1}), \dots\}$  и представлено на рис. 1. Графически пары совпадающих данных показаны сплошными линиями с двусторонними стрелками, а несовпадающие пары – пунктирными линиями (рис. 1).



**Рис. 1.** Оптимальное сочетание пар совпадающих данных наборов  $T_i$  и  $T_k = \bar{T}_i$  для одной серии из единиц  
**Fig. 1.** Optimal combination of matching data set pairs  $T_i$  and  $T_k = \bar{T}_i$  for single series of ones values case

Общее количество пар совпадающих и несовпадающих двоичных данных в наборах  $T_i$  и  $T_k$  определяется величинами  $Q_e$  и  $Q_n$  [7]. В случае, когда  $T_k = \bar{T}_i$ , учитывается свойство симметричности ( $AD(T_i, \bar{T}_i) = AD(\bar{T}_i, T_i)$ ) данной метрики и принимается ограничение  $w = w(T_i) \leq \lfloor n/2 \rfloor$ , количество совпадающих пар данных равняется  $2w$ , а несовпадающих –  $(n - 2w)$ .

Регулярность серии из  $w$  единиц в наборе  $T_i$  и соответствующей ей серии из нулей в наборе  $T_k = \bar{T}_i$ , как это видно из рис. 1, позволяет формализовать вычисление характеристики  $AD(T_i, T_k)$ .

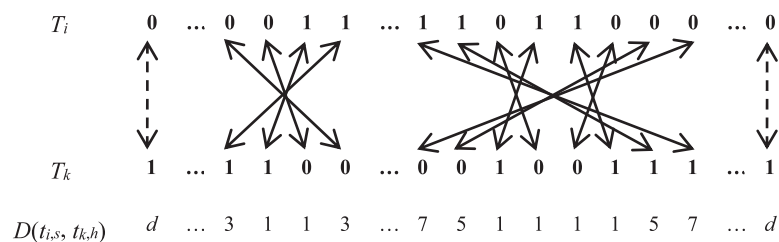


Слагаемыми для вычисления данной метрики являются расстояния между совпадающими данными, которые принимают следующие значения:  $D(t_{i,l+1}, t_{k,l}) = D(t_{i,l}, t_{k,l+1}) = D(t_{i,l+w}, t_{k,l+w+1}) = D(t_{i,l+w+1}, t_{k,l+w}) = 1$ ,  $D(t_{i,l+2}, t_{k,l-1}) = D(t_{i,l-1}, t_{k,l+2}) = D(t_{i,l+w-1}, t_{k,l+w+2}) = D(t_{i,l+w+2}, t_{k,l+w-1}) = 3$  и так далее для последующих пар совпадающих значений данных в наборах. Значения расстояний  $D(t_{i,s}, t_{k,h})$  приведены на рис. 1 для  $s, h \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$ . В зависимости от величины веса  $w$  максимальное значение расстояния для серии, состоящей из единиц, принимают расстояния  $D(t_{i,l+w/2}, t_{k,l-w/2+1}) = D(t_{i,l-w/2+1}, t_{k,l+w/2}) = D(t_{i,l+w/2+1}, t_{k,l+w+w/2}) = D(t_{i,l+w+w/2}, t_{k,l+w/2+1}) = w-1$  для четырех пар данных при четных  $w$ , и двух пар  $D(t_{i,l+(w+1)/2}, t_{k,l-(w+1)/2+1}) = D(t_{i,l-(w+1)/2+1}, t_{k,l+(w+1)/2}) = w$  в противном случае. Для остальных  $(n-2w)$  пар несовпадающих данных в наборах  $T_i$  и  $T_k = \bar{T}_i$ , согласно Определению 1, расстояние принимается равным  $\lfloor n/2 \rfloor$ , которое на рис. 1 обозначено символом  $d$  [7]. Окончательно выражение для характеристики  $AD(T_i, \bar{T}_i)$ , где  $w = w(T_i) \leq \lfloor n/2 \rfloor$ , а все единичные данные набора  $T_i$  расположены последовательно в виде серии из  $w$  единиц, принимает вид

$$AD(T_i, \bar{T}_i) = \lfloor n/2 \rfloor \cdot (n-2w) + 2w(w-2\lfloor w/2 \rfloor) + 4 \sum_{v=1}^{\lfloor w/2 \rfloor} (2v-1) = w^2 + (w-2\lfloor w/2 \rfloor) + \lfloor n/2 \rfloor \cdot (n-2w). \quad (1)$$

Выражение (1) справедливо только для набора  $T_i$  веса  $w$ , когда все  $w$  единичные данные расположены в виде одной серии. Для оценки меры различия  $AD(T_i, \bar{T}_i)$  при отсутствии ограничений на вид произвольного набора  $T_i$  приведем следующее утверждение.

**Утверждение 2.** Максимальное значение  $\max AD(T_i, \bar{T}_i)$  меры различия  $AD(T_i, \bar{T}_i)$ , где  $w = w(T_i)$ , равняется  $w^2 + (w-2\lfloor w/2 \rfloor) + \lfloor n/2 \rfloor \cdot (n-2w)$ . Учитывая, что для меры различия  $AD(T_i, \bar{T}_i)$  тестовых наборов  $T_i$  и  $T_k = \bar{T}_i$  выполняется требование симметричности ( $AD(T_i, \bar{T}_i) = AD(\bar{T}_i, T_i)$ ), будем рассматривать случай, когда  $w = w(T_i) \leq \lfloor n/2 \rfloor$ . Как было показано ранее для  $T_i$  с весом  $w = w(T_i) \leq \lfloor n/2 \rfloor$ , в котором  $w$  единиц представлены в виде серии,  $AD(T_i, \bar{T}_i) = w^2 + (w-2\lfloor w/2 \rfloor) + \lfloor n/2 \rfloor \cdot (n-2w)$ . Рассмотрим процедуру перехода от набора  $T_i$ , в котором все  $w$  единиц сгруппированы в виде одной серии, к набору с тем же весом  $w$ , но с большим количеством единичных серий. Первоначально исследуем  $T_i$ , в котором  $w$  единичных значений сгруппированы в виде двух серий, разделенных одним нулевым значением, как это показано на рис. 2.



**Рис. 2.** Оптимальное сочетание пар совпадающих данных наборов  $T_i$  и  $T_k = \bar{T}_i$  для двух серий из единиц  
**Fig. 2.** Optimal combination of matching data set pairs  $T_i$  and  $T_k = \bar{T}_i$  for two series of ones values

В силу симметрии пар совпадающих данных  $t_{i,j} = t_{k,r}$  рассмотрим только единичные значения  $t_{i,j}$ , так как аналогичные рассуждения будут верны и для  $t_{i,j} = 0$ , что следует из Утверждения 1. Построение двух серий из последовательных единичных значений  $t_{i,j} = 1$  на основании одной серии, состоящей из  $w$  единиц, заключается во внесении в эту серию нулевого значения  $t_{i,j}$ , как это показано на рис. 2. Соответственно в ту же позицию в набор  $T_k = \bar{T}_i$  вносится единичное значение. Для примера, приведенного на рис. 2, имеем  $T_i = 0 \dots 0 0 1 1 \dots 1 1 0 1 1 0 \dots 0$  и  $T_k = 1 \dots 1 1 0 0 \dots 0 0 1 0 0 1 \dots 1$ . В результате пара  $(t_{i,l+w-1}, t_{k,l+w+2})$  идентичных данных  $t_{i,l+w-1} = t_{k,l+w+2} = 1$ , для которых  $D(t_{i,l+w-1}, t_{k,l+w+2}) = 3$ , преобразовалась в пару  $(t_{i,l+w}, t_{k,l+w-1})$ , которая имеет расстояние  $D(t_{i,l+w}, t_{k,l+w-1}) = 1$ , т. е. в пару с меньшим расстоянием. Остальные пары единичных данных остались без изменений, так же, как и соответствующие им расстояния. В результате значение характеристики  $AD(T_i, \bar{T}_i)$  уменьшилось. Таким образом, можно заключить,

что преобразование набора  $T_i$ , для которого  $w = w(T_i)$  и все  $w$  единиц сгруппированы в виде одной серии, к набору с тем же весом  $w$ , но уже с двумя единичными сериями, приводит к тому, что значение  $AD(T_i, \bar{T}_i)$  не увеличивается. Продолжая подобную процедуру разбиения на серии из единичных значений, можно отметить, что характеристика  $AD(T_i, \bar{T}_i)$  полученных таким образом наборов не будет увеличиваться. Отсюда следует, что  $\max AD(T_i, \bar{T}_i)$  вычисляется согласно (1) и равняется величине, определяемой выражением  $w^2 + (w - 2 \lfloor w/2 \rfloor) + \lfloor n/2 \rfloor \cdot (n - 2w)$ .

**Утверждение 3.** Минимальное значение  $\min AD(T_i, \bar{T}_i)$  меры различия  $AD(T_i, \bar{T}_i)$ , где  $T_k = \bar{T}_i$  и  $w = w(T_i)$ , равняется  $2w + \lfloor n/2 \rfloor \cdot (n - 2w)$ . Для получения минимальной оценки меры различия  $AD(T_i, \bar{T}_i)$  рассмотрим минимальные значения слагаемых, участвующих в ее вычислении, т. е. расстояний  $D(t_{i,j}, t_{k,r})$  для наборов  $T_i$  и  $\bar{T}_i$ . В силу того, что набор  $T_k$  является инверсным по отношению к  $T_i$ , не существует пар идентичных данных  $t_{i,j} = t_{k,r}$ , для которых  $D(t_{i,j}, t_{k,r}) = 0$ . Минимально возможное значение расстояния  $D(t_{i,j}, t_{k,r})$  равняется 1, таким образом,  $w$  пар единичных данных и столько же нулевых (Утверждение 1) данных будут принимать минимальные значения расстояний, равные 1, а остальные  $(n - 2w)$  несовпадающие пары имеют расстояние  $\lfloor n/2 \rfloor$ . Окончательно получим  $\min AD(T_i, \bar{T}_i) = 2w + \lfloor n/2 \rfloor \cdot (n - 2w)$ .

### Мера различия $AD(T_i, T_k)$ для произвольных двоичных тестовых наборов $T_i$ и $T_k$

Для произвольных двоичных тестовых наборов  $T_i$  и  $T_k$  минимальное значение меры различия  $\min AD(T_i, T_k) = 0$ , которое достигается при  $T_i = T_k$  и вытекает из ее свойства тождественности [7]. Максимальное различие достигается, только когда наборы состоят из различных несовпадающих данных, т. е.  $T_i = 00 \dots 0000$ , а  $T_k = 11 \dots 1111$ , либо, наоборот,  $T_i = 11 \dots 1111$ , а  $T_k = 00 \dots 0000$ . В результате  $\max AD(T_i, T_k) = n \lfloor n/2 \rfloor$ .

В общем случае двоичные тестовые наборы различаются по их весу  $w_i = w(T_i)$  и  $w_k = w(T_k)$  и позволяют определять количество  $Q_e$  совпадающих пар данных  $t_{i,j} = t_{k,r}$  и количество  $Q_n$  пар несовпадающих данных  $t_{i,j} \neq t_{k,r}$ . Конкретные соотношения весов  $w_i = w(T_i)$  и  $w_k = w(T_k)$  и их значения позволяют уточнить оценки максимального и минимального значений меры различия  $AD(T_i, T_k)$ . Величины этих оценок могут уменьшить вычислительную сложность определения  $AD(T_i, T_k)$  либо вообще исключить необходимость ее вычисления. Поясним это утверждение на простейшем примере. Имеем два набора, для которых, например,  $w(T_i) = 1$  и  $w(T_k) = n - 1$ , и, соответственно,  $\min AD(T_i, T_k) = (n - 2) \cdot \lfloor n/2 \rfloor$ , а  $\max AD(T_i, T_k) = 2 + (n - 2) \cdot \lfloor n/2 \rfloor$ . Как видно, в данном случае  $\min AD(T_i, T_k)$  и  $\max AD(T_i, T_k)$  практически не отличаются и имеют большие значения. Это означает, что независимо от распределения данных в обоих наборах  $T_i$  и  $T_k$  с весами  $w(T_i) = 1$  и  $w(T_k) = n - 1$  указанные наборы имеют большое различие и не требуют точного вычисления  $AD(T_i, T_k)$ . Первоначально оценим  $\min AD(T_i, T_k)$ .

**Утверждение 4.** Минимальное значение  $\min AD(T_i, T_k)$  меры различия  $AD(T_i, T_k)$  запишется как  $Q_n \lfloor n/2 \rfloor = \max(w_i, w_k) \cdot \lfloor n/2 \rfloor - \min(w_i, w_k) \cdot \lfloor n/2 \rfloor$ . Значение  $\min AD(T_i, T_k)$  достигается в том случае, когда для всех  $Q_e = n + \min(w_i, w_k) - \max(w_i, w_k)$  пар совпадающих данных  $D(t_{i,j}, t_{k,r}) = 0$ . Тогда  $\min AD(T_i, T_k) = Q_e \cdot 0 + Q_n \lfloor n/2 \rfloor$ . Для ранее рассмотренного примера наборов  $T_i$  и  $T_k$  с весами  $w(T_i) = 1$  и  $w(T_k) = n - 1$  при  $n = 8$  указанное  $\min AD(T_i, T_k) = 24$  достигается в случае, когда, например,  $T_i = 10000000$ , а  $T_k = 11111110$ .

**Утверждение 5.** Максимальное значение  $\max AD(T_i, T_k)$  меры различия  $AD(T_i, T_k)$  запишется в виде  $(w_k - w_i) \cdot \lfloor n/2 \rfloor + 2 \lceil (n - w_k) / 2 \rceil \cdot \lceil w_i / 2 \rceil + 2 \lfloor (n - w_k) / 2 \rfloor \cdot \lfloor w_i / 2 \rfloor$ , где  $w_i = w(T_i) \leq w_k = w(T_k)$  и  $w_i \leq n - w_k$ . Первоначально сформулируем условия и ограничения для получения оценки максимального значения  $AD(T_i, T_k)$  в случае произвольных наборов  $T_i$  и  $T_k$  с весами  $w_i = w(T_i)$  и  $w_k = w(T_k)$ . Отметим, что, основываясь на Утверждении 1, задачу вычисления характеристики  $AD(T_i, T_k)$  для  $T_i$  и  $T_k$  можно рассматривать как задачу вычисления этой же характеристики для инверсных значений наборов  $T_i$  и  $T_k$ . Кроме того, принимая во внимание свойство симметрии  $AD(T_i, T_k)$ , будем рассматривать случай, когда  $w_i \leq w_k$ . Таким образом, при любом сочетании значений весов  $w_i$  и  $w_k$  наборов  $T_i$  и  $T_k$  вычисление значения  $AD(T_i, T_k)$  можно свести к задаче вычисления данной характеристики для случаев, когда  $w_i \leq w_k$  и  $w_i \leq n - w_k$ .

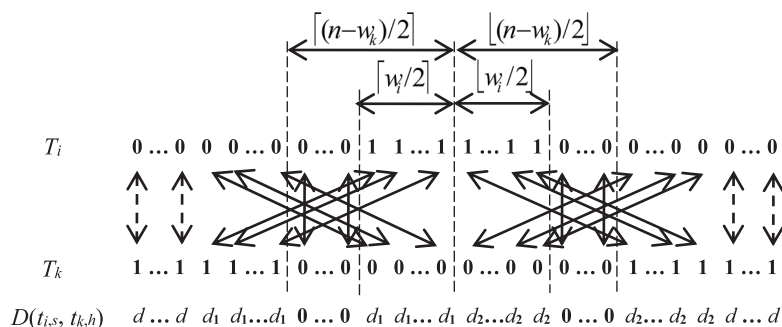
Первоначально рассмотрим наборы  $T_i$  и  $T_k$ , когда все  $w_i$  единиц в  $T_i$  и все  $w_k$  единиц в  $T_k$  расположены в виде одной серии. Предположим, что первые  $w_i$  значений данных  $t_{i,j}$  набора  $T_i$  и первые  $w_k$

данных  $t_{k,r}$  набора  $T_k$  принимают единичные значения, подобно как для случаев  $T_i = 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0$  и  $T_k = 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0$ . Взаимное расположение единичных серий в наборах  $T_i$  и  $T_k$  будет определять значение характеристики  $AD(T_i, T_k)$ . Так, для  $T_i = 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0$  и  $T_k = 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0$  имеем  $AD(T_i, T_k) = 8$ . Такое же значение будет для  $T_i$  и  $T_k$  наборов:  $\{0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0, 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\}$ ;  $\{0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0, 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\}$ . В то же время максимальное значение  $AD(T_i, T_k) = 16$  достигается для  $T_i = 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0$  и  $T_k = 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0$ . В общем случае существует  $n$  взаимных расположений единичных серий наборов  $T_i$  и  $T_k$ . В качестве примера все возможные значения величин  $AD(T_i, T_k)$  для различного взаимного расположения единичных серий наборов  $T_i = 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0$  и  $T_k = 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1$  приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Значения характеристики  $AD(T_i, T_k)$  для  $T_i = 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0$  и  $T_k = 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1$   
**Table 1.** Values of characteristic  $AD(T_i, T_k)$  for  $T_i = 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0$  and  $T_k = 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1$

$AD(T_i, T_k)$	8	12	16	16	16	12	8	8
$T_i$	11000000	01100000	00110000	00011000	00001100	00000110	00000011	10000001
$T_k$	11000011	11000011	11000011	11000011	11000011	11000011	11000011	11000011

Рассматривая наборы  $T_i$  и  $T_k$  с принятыми ранее ограничениями как циклические наборы данных, можно отметить наличие в них по одной серии из единиц и одной серии из нулей. В наборе  $T_i$  имеем серию из  $w_i$  единиц и серию из  $(n - w_i)$  нулей, а в наборе  $T_k$  – серию из  $w_k$  единиц и серию из  $(n - w_k)$  нулей соответственно. Взаимное расположение этих серий и определяет величину  $AD(T_i, T_k)$ . Анализ рассмотренного выше примера и данных, приведенных в табл. 1, показывает, что максимальное значение характеристики  $AD(T_i, T_k)$  для наборов  $T_i$  и  $T_k$  достигается при максимальном удалении единичной серии набора  $T_i$  от единичной серии набора  $T_k$ . Либо, что есть то же самое, при симметричном расположении единичной серии из  $w_i$  единиц набора  $T_i$  по отношению к нулевой серии из  $(n - w_k)$  нулей набора  $T_k$ . Отметим, что, согласно принятым ограничениям,  $w_i \leq (n - w_k)$ . Для четных значений  $w_i = 2$  и  $(n - w_k) = 4$  в примере, представленном в табл. 1,  $AD(T_i, T_k)$  принимает максимальное значение 16. Для произвольных значений величин  $n$ ,  $w_i$  и  $(n - w_k)$  схема оптимального сочетания пар для вычисления  $AD(T_i, T_k)$  в соответствии с Определением 1 приведена на рис. 3.



**Рис. 3.** Оптимальное сочетание пар совпадающих данных наборов  $T_i$  и  $T_k$   
**Fig. 3.** Optimal combination of matching data set pairs  $T_i$  and  $T_k$

Аналогично, как и на рис. 1, пары совпадающих данных показаны сплошными линиями с двусторонними стрелками, а несовпадающие пары – пунктирными линиями. Общая схема сочетаний пар данных, представленных на рис. 3, позволяет получить выражение для вычисления  $\max AD(T_i, T_k)$ . Количество пар несовпадающих двоичных данных в наборах  $T_i$  и  $T_k$ , как было показано ранее, запишется как  $w(T_k) - w(T_i) = w_k - w_i$ , для которых, согласно Определению 1,  $D(t_{i,s}, t_{k,h}) = \lfloor n/2 \rfloor$ . Пары совпадающих данных могут иметь три возможных значения. Во-первых,  $(n - w_k - w_i)$  пар будут иметь нулевое расстояние  $D(t_{i,s}, t_{k,h}) = 0$ . Далее, как видно из схемы пар данных на рис. 3, расстояние  $D(t_{i,s}, t_{k,h}) = d_1 = \lceil (n - w_k) / 2 \rceil$  имеет  $2 \lceil w_i / 2 \rceil$  пары идентичных данных, а расстояние  $D(t_{i,s}, t_{k,h}) = d_2 = \lfloor (n - w_k) / 2 \rfloor$  соответствует  $2 \lfloor w_i / 2 \rfloor$  парам. Окончательно  $\max AD(T_i, T_k) = (w_k - w_i) \cdot \lfloor n/2 \rfloor + 2 \lceil (n - w_k) / 2 \rceil \cdot \lceil w_i / 2 \rceil + 2 \lfloor (n - w_k) / 2 \rfloor \cdot \lfloor w_i / 2 \rfloor$ . Отметим, что для вычисления  $\max AD(T_i, T_k)$  возможно альтернативное оптимальное сочета-

ние пар совпадающих данных, аналогичное сочетанию, представленному на рис. 1. В обоих случаях результат одинаков. Для примера наборов  $T_i$  и  $T_k$  с  $w(T_i) = 1$  и  $w(T_k) = n - 1$  при  $n = 8$  значение  $\max AD(T_i, T_k) = 26$  достигается в случае, когда, например,  $T_i = 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0$ , а  $T_k = 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1$ . Аналогично, как и для случая инверсных наборов, можно показать, что преобразование наборов  $T_i$  и  $T_k$ , для которых все  $w_i$  и  $w_k$  единиц сгруппированы в виде серии, к наборам с теми же весами  $w_i$  и  $w_k$ , но уже с большим числом единичных серий, приводит к тому, что значение  $AD(T_i, T_k)$  не увеличивается. Соответственно получим, что  $\max AD(T_i, T_k) = (w_k - w_i) \cdot \lfloor n/2 \rfloor + 2 \lceil (n - w_k)/2 \rceil \cdot \lceil w_i/2 \rceil + 2 \lfloor (n - w_k)/2 \rfloor \cdot \lfloor w_i/2 \rfloor$ .

### Экспериментальные результаты

Для проверки правильности полученных теоретических результатов провели эксперименты для вычисления меры различия  $AD(T_i, T_k)$  согласно Определению 1. В качестве метода вычисления данной характеристики использовали Венгерский алгоритм, применяемый для решения задачи о назначениях [7]. Результаты, показывающие корректность Утверждений 2 и 3, приведены в табл. 2, где представлены максимальные и минимальные значения данной меры  $AD(T_i, \bar{T}_i)$ , полученные для большого числа наборов  $T_i$  с различными значениями  $w$  для разных  $n$ .

**Таблица 2.** Значения  $\min AD(T_i, \bar{T}_i)$  и  $\max AD(T_i, \bar{T}_i)$  для различных  $n$   
**Table 2.** Values of  $\min AD(T_i, \bar{T}_i)$  and  $\max AD(T_i, \bar{T}_i)$  for various  $n$

$n$	$w$	$\max AD(T_i, \bar{T}_i)$	$\min AD(T_i, \bar{T}_i)$	Количество наборов $T_i$
8	3	18	14	56
	4	16	8	70
9	3	22	18	84
	4	20	12	126
16	3	90	86	560
	4	80	72	1820
	7	66	30	11 440
	8	64	16	12 870
32	3	426	422	4960
	4	400	392	30 000
	10	292	212	100 000
	11	282	182	100 000

Справедливость теоретических результатов, сформулированных в Утверждениях 4 и 5 для произвольных тестовых наборов  $T_i$  и  $T_k$ , подтверждают данные, приведенные в табл. 3.

**Таблица 3.** Значения меры различия  $AD(T_i, T_k)$  для произвольных наборов  $T_i$  и  $T_k$   
**Table 3.** Values of dissimilarity measure  $AD(T_i, T_k)$  for arbitrary patterns  $T_i$  and  $T_k$

$n$	$w_i$	$w_k$	$\max AD(T_i, T_k)$	$\min AD(T_i, T_k)$	$av AD(T_i, T_k)$	Количество пар наборов $T_i$ и $T_k$ с весами $w_i$ и $w_k$
16	1	3	30	16	19.1513	8960
	2	4	40	16	22.2669	30 000
	2	12	88	80	81.0568	30 000
	2	14	100	96	96.3393	14 400
32	2	4	88	32	45.5338	30 000

Как видно из приведенных в табл. 2 данных, для небольших значений  $w$  по отношению к  $n$  значения  $\min AD(T_i, \bar{T}_i)$  и  $\max AD(T_i, \bar{T}_i)$  практически не отличаются, что позволяет использовать значение  $\min AD(T_i, \bar{T}_i)$ , полученное в соответствии с Утверждением 4, в качестве оценки меры различия  $AD(T_i, \bar{T}_i)$ . Анализ данных, полученных для произвольных тестовых наборов  $T_i$  и  $T_k$  и частично представленных в табл. 3, показывает тенденцию к близости среднего значения меры различия  $av AD(T_i, T_k)$  к ее минимальному значению  $\min AD(T_i, T_k)$ . Приведенные практические результаты полностью подтверждают граничные оценки значений для мер различия  $AD(T_i, \bar{T}_i)$  и  $AD(T_i, T_k)$ , сформулированные в виде Утверждений 2–5. Их численные значения в ряде случаев

могут быть использованы в качестве самих мер различия  $AD(T_i, \overline{T_i})$  и  $AD(T_i, T_k)$ , что позволит избежать трудоемких вычислений их точных значений [7].

## Выводы

Получены оценки максимальных и минимальных значений мер различия  $AD(T_i, \overline{T_i})$  и  $AD(T_i, T_k)$  для произвольного случая двоичных тестовых наборов  $T_i$  и  $T_k$ . Экспериментально подтверждены их корректность и возможность применения в качестве оценочных значений меры различия, сформулированной в Определении 1. Дальнейшие исследования целесообразно расширить в части свойств новой меры отличия для различных сочетаний весов тестовых наборов и их размерности, а также применимости данной меры различия для других прикладных задач.

## Список литературы

1. A Survey on Adaptive Random Testing / R. Huang [et al.] // IEEE Transactions on Software Engineering. 2021. Vol. 47, No 10. P. 2052–2083. DOI: 10.1109/tse.2019.2942921.
2. An Empirical Comparison of Combinatorial Testing, Random Testing and Adaptive Random Testing / H. Wu [et al.] // IEEE Transactions on Software Engineering. 2020. Vol. 46, No 3. P. 302–320.
3. Ярмолик, В. Н. Многократные управляемые вероятностные тесты / В. Н. Ярмолик, В. А. Леванцевич, И. Мрозек // Информатика. 2015. № 2. С. 63–76.
4. Sadvovsky, M. G. Comparison of Symbol Sequences: no Editing, no Alignment / M. G. Sadvovsky // Open Systems & Information Dynamics. 2002. Vol. 9, No 1. P. 19–36. <https://doi.org/10.1023/A:1014278811727>.
5. Ярмолик, В. Н. Мера отличия для управляемых вероятностных тестов / В. Н. Ярмолик, Н. А. Шевченко, В. В. Петровская // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 6. С. 52–60. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-52-60>.
6. О мерах сходства расположения компонентов в массивах естественно упорядоченных данных / А. С. Гуменюк [и др.] // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18, № 2. С. 471–503. <https://doi.org/10.15622/sp.18.2.471-503>.
7. Ярмолик, В. Н. Мера различия для тестовых наборов при генерировании управляемых вероятностных тестов / В. Н. Ярмолик, В. В. Петровская, И. Мрозек // Информатика. 2022. Т. 19, № 4. С. 7–26.
8. Гайдамакин, Н. А. Мера сходства последовательностей одинаковой размерности / Н. А. Гайдамакин // Математические структуры и моделирование. 2016. Т. 40, № 4. С. 5–16.

## References

1. 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. DOI: 10.1109/tse.2019.2942921.
2. Wu H., Nie C., Petke Y., Jia Y., Harman M. (2020) An Empirical Comparison of Combinatorial Testing, Random Testing and Adaptive Random Testing. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 46 (3), 302–320.
3. Yarmolik V. N., Levantsevich B. A., Mrozek I. (2015) Multiple Controlled Random Tests. *Informatics*. (2), 63–76 (in Russian).
4. Sadvovsky M. G. (2002) Comparison of Symbol Sequences: no Editing, no Alignment. *Open Systems & Information Dynamics*. 9 (1), 19–36. <https://doi.org/10.1023/A:1014278811727>.
5. Yarmolik V. N., Shauchenka M. A., Petrovskaya V. V. (2022) Distance Measure for Controlled Random Tests. *Doklady BGUIR*. 20 (6), 52–60. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-52-60> (in Russian).
6. Gumenjuk A. S., Skiba A. A., Pozdnichenko N. N., Shpunov S. N. (2019) On the Measures of Similarity of the Arrangement of Components in Arrays of Naturally Ordered Data. *Proc. SPIIRAS*. 18 (2), 471–503 (in Russian).
7. Yarmolik V. N., Petrovskaya V. V., Mrozek I. (2022) A Measure of the Difference between Test Sets for Generating Controlled Random Tests. *Informatics*. 19 (4), 7–26 (in Russian).
8. Gaydamakin N. A. (2016) Measures of Similarity Among Finite Sequences. *Mathematical Structures and Simulation*. 40 (4), 5–16 (in Russian).

## Вклад авторов

Ярмолик В. Н. предложил меру отличия для управляемых вероятностных тестов.  
Петровская В. В. участвовала в обобщении результатов и проведении экспериментов.  
Иванюк А. А. принял участие в анализе результатов и проведении экспериментов.

### Authors' contribution

Yarmolik V. N. proposed a distance measure for controlled random tests.

Petrovskaya V. V. took part in the generalization of the results and conduct of experiment.

Ivaniuk A. A. took part in the analysis of the results and experiments.

### Сведения об авторах

**Ярмолик В. Н.**, д. т. н., профессор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Петровская В. В.**, магистр т. н. Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Иваниук А. А.**, д. т. н., доцент, профессор кафедры информатики, заведующий совместной учебной лабораторией «СК хайникс мемори солюшнс Восточная Европа» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

### Адрес для корреспонденции

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

### Information about the authors

**Yarmolik V. N.**, Dr. of Sci. (Eng.), Professor at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Petrovskaya V. V.**, M. of Sci. at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Ivaniuk A. A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor at the Computer Science Department, Head of the Joint Educational Laboratory "SK Hynix Memory Solutions Eastern Europe" of the 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 29 769-96-77  
E-mail: yarmolik10ru@yahoo.com  
Yarmolik Vyacheslav Nikolaevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-95-103>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 004.056

## МОДЕЛЬ И МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В. А. КАСУМОВ, ДЖ. И. МАМЕДОВ

*Азербайджанский технический университет (г. Баку, Республика Азербайджан)*

*Поступила в редакцию 19.12.2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Исследована проблема информационной безопасности критических информационных инфраструктур. Проанализированы особенности критически важных объектов с точки зрения сбора, обработки, хранения и передачи информации. Изучены совокупность функций, выполняемых системой обеспечения безопасности информации в критических инфраструктурах, и зависимости между этими функциями. Предложена модель системы обеспечения безопасности и определены требования, предъявляемые к ней. Множество отношений между объектами и угрозами представлено в виде графа отношений «объект – угроза», в котором ребро, связывающее  $j$ -й объект с  $i$ -й угрозой, существует только тогда, когда  $i$ -я угроза может воздействовать напрямую на  $j$ -й объект. Для защиты объектов критических информационных инфраструктур от возможных угроз в модель системы обеспечения безопасности введено множество необходимых методов и средств, преобразующее двухдольный граф в трехдольный, типа «объект – метод – угроза». Рассмотрена задача определения оптимальной структуры системы обеспечения безопасности объектов критической информационной инфраструктуры, решение которой позволит свести к минимуму материальные затраты на реализацию средств защиты и ущерб от нарушения безопасности.

**Ключевые слова:** критические инфраструктуры, защита информации, модель системы безопасности, угрозы, граф отношений, ущерб от нарушения, оптимальная структура системы.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Касумов, В. А. Модель и метод определения оптимальной структуры системы обеспечения безопасности для критической информационной инфраструктуры / В. А. Касумов, Дж. И. Мамедов // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 2. С. 95–103. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-95-103>.

## MODEL AND METHOD FOR DETERMINING THE OPTIMAL STRUCTURE OF THE SECURITY SYSTEM FOR CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE

VAGIF A. GASIMOV, JABIR I. MAMMADOV

*Azerbaijan Technical University (Baku, Republic of Azerbaijan)*

*Submitted 19.12.2022*

**Abstract.** The article investigates the problem of information security of critical information infrastructures. The features of critical objects from the point of view of collecting, processing, storing and transmitting information are analysed. The set of functions performed by the information security system in critical infrastructures and the dependencies between these functions are studied. A model of the security system is proposed and the require-

ments for this model are defined. At the same time, the set of relations between objects and threats is represented in the form of an object-threat relationship graph, in which an edge connecting the  $j$ -th object with the  $i$ -th threat exists only when the  $i$ -th threat can directly affect the  $j$ -th object. To protect objects of critical information infrastructures from possible threats, a set of necessary methods and tools has been introduced into the model of the security system, which converts a two-sided graph into a three-sided one, such as “object – method – threat”. Further in the article, the problem of determining the optimal structure of the security system for critical information infrastructure objects is considered. It is assumed here that each threat can affect several objects, and that any object can be affected by more than one threat. The solution of this problem makes it possible to minimize the material costs to implement the methods and tools for protection and minimize damage from a security breach.

**Keywords:** critical infrastructures, information protection, security system model, relationship graph, damage from breach, optimal system structure.

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

**For citation.** Gasimov V. A., Mammadov J. I. Model and Method for Determining the Optimal Structure of the Security System for Critical Information Infrastructure. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 95–103. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-95-103> (in Russian).

## Введение

Обеспечение безопасности критических инфраструктур является актуальной научной и практической задачей, так как их выход из строя приводит к нарушению работы всех сфер государственных структур. Статистика инцидентов в разных странах показывает, что угрозы, реализуемые по отношению к критическим инфраструктурам, в основном направлены на их информационные системы. В связи с этим обеспечение безопасности указанных систем должно являться приоритетным направлением обеспечения безопасности критических инфраструктур.

В настоящее время существует множество отдельных методов и средств обеспечения безопасности информационных систем. Но основной проблемой для специалистов является выбор наиболее эффективных из них для предотвращения угрозы информационной системе в конкретных случаях. В [1] представлено исследование, в результате которого изучены модели и методы создания эффективной системы обеспечения безопасности (СОБ) информации для распределенных компьютерных сетей, определена зависимость между потерями от угроз и стоимостью самой системы. Рекомендовано построить такую СОБ, структура которой являлась бы оптимальной, охватывала все возможные методы и средства обеспечения безопасности, но стоимость не превышала бы суммарный объем возможных потерь. Для этого была поставлена задача оптимизации, чтобы ее решение дало средневзвешенную величину ущерба (временных и материальных затрат) от нарушения безопасности системы в целом. Однако следует отметить, что в указанной модели не учитываются мероприятия и затраченные на них средства по ликвидации последствий реализованных угроз.

Авторами данной статьи исследована задача оптимизации структуры системы обеспечения безопасности информации в критических информационных инфраструктурах (КИИ). При этом учитывались особенности системы, указанные в [1]. Критическая инфраструктура – термин, используемый правительствами для описания активов, которые необходимы для функционирования общества и экономики страны. Другими словами, критическая инфраструктура – это объекты инфраструктуры, системы, их части и их совокупность, которые важны для экономики, национальной безопасности и обороны, нарушение функционирования которых может нанести вред жизненно важным национальным интересам.

Критически важный объект – это объект, нарушение и приостановление деятельности которого приводит к утрате управления экономикой страны, государственного субъекта, административно-территориальной единицы, либо к снижению безопасности жизнедеятельности населения [2]<sup>1</sup>. Критическая информационная инфраструктура представляет собой совокупность автоматизированных систем управления технологическими и производственными процессами критических объектов и обеспечивает их взаимодействие с информационно-телекоммуникационными сетями, а также коммуникационными сетями и информационными системами, предназначенными для обеспечения государственного управления, обороноспособности и безопасности.

<sup>1</sup> Concepts, Classification and Regulation of Critical Information Infrastructure. <https://rutlib5.com/book/27296>.



Системы обработки информации обычно состоят из локальных сетей и отдельных компьютеров, которые распределены и взаимодействуют друг с другом с точки зрения данных и управления. Для сбора, обработки, хранения и передачи информации основными характеристиками систем обработки информации критических инфраструктурных объектов (КИО) являются следующие [3]:

- территориальная разбросанность компонентов системы и наличие между ними интенсивного информационного обмена;
- широкий спектр использования, хранения и передачи информации, а также методов описания;
- агрегирование данных разного назначения, принадлежащих различным субъектам, в рамках единой базы данных и, наоборот, размещение данных, необходимых тем или иным субъектам, в разных удаленных узлах сети;
- изоляция владельцев данных от физических структур и местонахождения данных;
- использование распределенных режимов обработки данных;
- участие большого количества пользователей и различных категорий персонала в автоматизированной обработке информации;
- одновременный и прямой доступ к информационным ресурсам большого количества различных категорий пользователей;
- высокий уровень разнообразия используемой компьютерной техники и средств связи, а также их программного обеспечения;
- отсутствие специальной аппаратной защиты у большинства основных технических средств, широко используемых в системе.

Анализ этих особенностей позволяет заблаговременно выявлять слабые места информационных систем КИО, угрозы безопасности, оценивать и управлять рисками, а также принимать защитные меры в соответствии с уровнями риска. Наличие вышеперечисленных особенностей создает условия для реализации многих естественных и искусственных угроз на информационные системы КИО. К таким угрозам можно отнести нарушение работы информационной системы КИО и средств ее защиты, несанкционированный доступ к системе и информационным ресурсам, изоляцию законных пользователей. Кроме того, такие угрозы, как нарушение работы, вызванные некомпетентным использованием охранных устройств обслуживающим персоналом, изменением их параметров и самовольным отключением, ошибочной отправкой данных на другой адрес, вводом неверных данных, неосознанным заражением системы компьютерными вирусами и т. п.

Как уже отмечалось, сегодня существует множество отдельных методов и средств защиты информации от тех или иных угроз, предназначенных для защиты, по крайней мере, одного объекта от одной угрозы, т. е. для противостояния одной угрозе. Но даже достаточно надежные методы и средства, разработанные и используемые автономно, не способны должным образом защищать объекты от угроз и исключать слабые (легко уязвимые) места в системе защиты данных. Отсюда можно сделать вывод, что безопасность данных может быть обеспечена и поддержана комплексом программных, аппаратных и организационных методов и средств защиты, которые выполняют свои функции в тесном взаимодействии с основными компонентами КИИ. Другими словами, для надежного решения проблемы обеспечения информационной безопасности требуется разработка хорошо организованной, эффективно действующей СОБ, основными задачами которой являются выбор эффективной структуры системы, упорядочивание функций общесистемных средств информационной безопасности, синтез структуры компонентов, оценка надежности защиты информации и т. д.

Следует отметить, что при разработке архитектуры СОБ для критически важных информационных инфраструктур особое внимание необходимо уделять проектированию и реализации общесистемных средств защиты. От их удачного проектирования во многом зависят такие характеристики, как надежность, отказоустойчивость и настраиваемость системы, мобильность и реализуемость программно-технических средств, стоимость и удобство эксплуатации, затраты на реализацию средств защиты, материальные и временные ущербы от нарушения безопасности. Перечисленные характеристики ставят свои требования к системе обеспечения безопасности и, следовательно, степенью предъявления этих требований определяется ее сложность.

Наиболее эффективными СОБ являются те, в которых реализованы все возможные и доступные методы и средства – как инженерно-технические, так и нетехнические. Однако реализация такого комплекса далеко не всегда может привести к желаемому результату. При этом следу-

ет учитывать, что ущерб от нарушения безопасности защищаемой информации или от различных несанкционированных действий может быть гораздо меньше стоимости СОБ (т. е. расходов на создание такой системы). Поэтому задача исследования и разработки экономически оптимальных СОБ, обеспечивающих наименьший риск владельцу и пользователям информации от ущерба и потерь в результате несанкционированных действий, является актуальной. В качестве основных параметров создания оптимальной СОБ можно рассмотреть ожидаемые суммарные потери и расходы в процессе защиты информации в течение определенного периода времени [4]. Исследования авторов статьи направлены на решение вопросов создания эффективной структуры СОБ, предназначенной для выполнения функций управления комплексом средств обеспечения безопасности данных, анализа риска и состояния системы, определения и оценки видов угроз, а также применения средств противодействия выявленным угрозам в КИИ.

### **Функциональное описание и модель системы обеспечения безопасности объектов критической информационной инфраструктуры**

Основными задачами, подлежащими решению при обеспечении информационной безопасности в КИИ, являются [5]:

- оценка потенциально возможного ущерба от нарушения информационной безопасности объектов КИИ;
- формирование более полного перечня угроз объектам КИИ информационной безопасности и определение их характеристик;
- разработка методологии определения и прогнозирования значений характеристических показателей информационной безопасности объектов КИИ;
- определение политики безопасности КИИ;
- исследование и разработка системы решений, обеспечивающих информационную безопасность объектов КИИ непрерывно;
- исследование и разработка способов, методов и средств эффективной реализации решений задач информационной безопасности;
- формирование системы условий, необходимых для эффективной реализации решений задач информационной безопасности или способствующих повышению их эффективности.

При организации работ по обеспечению информационной безопасности рекомендуется соблюдать следующие основные принципы:

- обеспечение безопасности информации в КИИ должно быть непрерывным процессом, заключающимся в систематическом контроле защищенности, выявлении узких и слабых мест, обосновании и реализации наиболее рациональных путей совершенствования и развития СОБ;
- безопасность информации в КИИ может быть обеспечена лишь при комплексном использовании и взаимодействии всего арсенала имеющихся средств защиты;
- никакая СОБ не способна обеспечить безопасность информации без надлежащей подготовки пользователей и соблюдения ими всех правил защиты;
- никакую СОБ нельзя считать абсолютно надежной, другими словами, следует учитывать, что может найтись такой умелый злоумышленник, который отыщет лазейку для доступа к информации.

Система обеспечения безопасности в КИИ является самым верхним в системной иерархии компонентом и в соответствии с отмеченными выше задачами должна выполнять следующие функции [5]: управление входом пользователей в систему, контроль доступа к системе и ее ресурсам, регистрация входов и обращений к системе, установление подлинности (аутентификация) пользователя и системы, контроль полномочий и привилегий пользователей, защита конфиденциальности информации, управление ключами (паролями) пользователей, обеспечение целостности и удостоверение подлинности данных, анализ состояния и контроль угроз, предотвращение нарушений в системе, реконфигурация системы обеспечения безопасности. Функции, выполняемые СОБ, в зависимости от ее структуры могут иметь следующие взаимоотношения между собой: могут выполняться независимо друг от друга, могут быть выполнены в строгой последовательности, выполнение одной функции может быть согласовано с другими функциями (даже со всеми), выполнение одной функции может вызывать выполнение других, выполнение одной функции может запретить выполнение других и даже потребовать отмены выполняемых.

Рассмотрим модель СОБ объектов КИИ. В целом КИИ – это совокупность информационных систем и телекоммуникационных сетей, критически важных для работы ключевых сфер жизнедеятельности государства и общества. Информационные системы объектов КИИ объединены телекоммуникационными сетями передачи данных, могут быть представлены в виде множества информационных ресурсов и прикладных процессов, которые для выполнения своих функций используют сетевые и системные ресурсы КИИ. В качестве ресурсов КИИ могут быть серверы, сервисные функции, базы данных или файлы в компьютере, информация, расположенная на носителе информации, устройства, подключенные к системе КИИ, процесс, выполняющийся в системе КИИ, и т. п. При этом все ресурсы могут быть разделены на активные, для выполнения собственных функций использующие другие ресурсы КИИ, и пассивные, участвующие при выполнении каких-либо функций под управлением активных ресурсов. Необходимо отметить, что ресурс может быть пассивным в один момент времени и активным в другой. Все ресурсы системы в дальнейшем назовем объектами КИИ.

Средства обеспечения безопасности данных можно разделить на два основных класса: локальные и распределенные средства защиты. Локальные средства защиты информации являются принадлежностью систем или сетей отдельных объектов КИИ и выполняют проверку возможности доступа пользователей и других к запрашиваемым ресурсам. Распределенные средства защиты информации обеспечивают управление потоками защищаемых данных в географически распределенных объектах КИИ и выполняют свои функции в тесном взаимодействии с сетевыми протоколами управления обработки и передачи данных.

СОБ должна иметь, по крайней мере, одно средство для обеспечения безопасности на каждом возможном пути проникновения в систему или доступа к объектам КИИ. В модели СОБ точно определяются все области, требующие защиты, оцениваются средства обеспечения безопасности с точки зрения их эффективности и их вклад в обеспечение безопасности во всей сетевой среде КИИ. Предполагается, что несанкционированный доступ к каждому из наборов защищаемых объектов сопряжен с некоторой величиной ущерба для своего владельца при нарушении безопасности. Также для ликвидации последствий совершенных угроз и полного восстановления работы программно-технических и информационных систем объектов КИИ требуются определенные материальные затраты.

В модели СОБ с каждым объектом КИИ, требующим защиты, связывается некоторое множество злоумышленных действий, т. е. угроз. В качестве набора угроз  $T = \{t_j\}, j = \overline{1, J}$ , направленных на нарушение безопасности, можно перечислить все потенциальные злоумышленные действия по отношению ко всем объектам  $O = \{o_i\}, i = \overline{1, I}$  КИИ. Основной характеристикой набора угроз является  $P = \|p_{ij}\|_{I \times J}$  – вероятность или частота появления угрозы  $t_j$  относительно объекта  $o_i$  [6, 7].

Множество отношений между объектами и угрозами можно представить в виде графа отношений «объект – угроза» (рис. 1), в котором ребро  $(t_j, o_i)$  существует тогда и только тогда, когда угроза  $t_j$  может воздействовать напрямую на объект  $o_i$ .

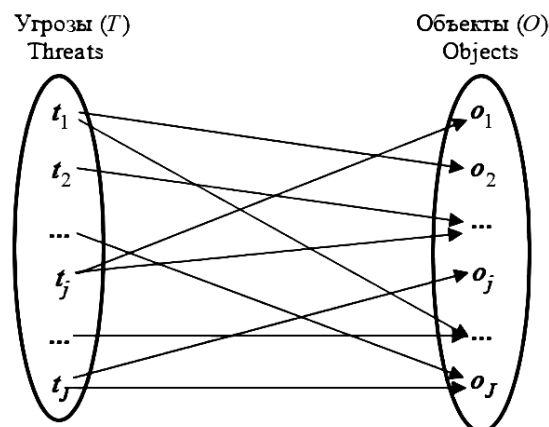


Рис. 1. Граф отношений «объект – угроза» базовой модели  
Fig. 1. Graph of relations “object – threat” of the base model

Как видно из рисунка, связь между угрозами и объектами не является типа «один к одному». Другими словами, угроза может оказать воздействие на любое число объектов, а также на любой объект может воздействовать более чем одна угроза. Суть обеспечения информационной безопасности КИИ состоит в том, чтобы исключить все ребра графа типа  $(t_j, o_i)$  или свести к минимуму их количества, указывающие пути доступа угроз  $t_j$  на объекты  $o_i$ . Для этого в модель отношений «объект – угроза» вводится множество методов и средств защиты  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ , которое должно обеспечивать безопасность всех объектов КИИ. Каждое средство  $m_k$  этого множества должно противостоять хотя бы одной угрозе, т. е. устранять хотя бы одно ребро  $(t_j, o_i)$  из заданного графа.

Таким образом, включение набора методов и средств обеспечения безопасности  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$  преобразует двухдольный граф в трехдольный (рис. 2). Другими словами, в защищаемой системе все ребра типа  $(t_j, o_i)$  разбиваются на две части и представляются в форме  $(t_j, m_k)$  и  $(m_k, o_i)$ .

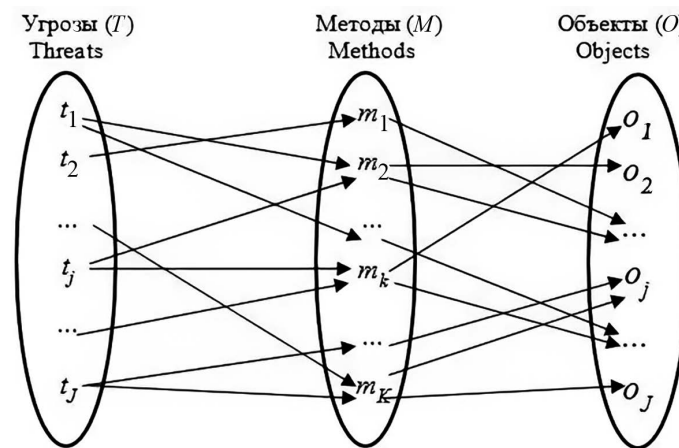


Рис. 2. Граф отношений «объект – метод – угроза» базовой модели  
Fig. 2. Graph of relations “object – method – threat” of the base model

Понятно, что существование ребра типа  $(t_j, o_i)$  указывает незащищенность объекта  $o_i$ . Следует отметить, что отсутствие ребра  $(t_j, o_i)$  не гарантирует полную безопасность объекта  $o_i$ , хотя наличие такой связи дает потенциальную возможность существования угрозы, за исключением случая, когда вероятность появления ее равна нулю. Учитывая вышесказанное, базовую систему СОБ для КИИ можно представить следующим образом:

$$S = \{O, T, M, V, B\}, \quad (1)$$

где  $O = \{o_1, o_2, \dots, o_l\}$  – множество защищаемых объектов (информационных, технических и иных ресурсов) КИИ;  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_j\}$  – множество злоумышленных действий (угроз), нарушающих безопасность объектов КИИ;  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$  – множество методов и средств обеспечения безопасности защищаемых объектов КИИ;  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_j\}$  – множество уязвимых мест в объектах КИИ, используемых угрозами, т. е. отображения типа  $T \times O$  на множество упорядоченных  $v_j = (t_j, o_i)$ , представляющих собой пути проникновения угрозы  $t_j$  в объект  $o_i$ ;  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_l\}$  – множество «защитных барьеров», реализуемых для объекта  $o_i$ , т. е. отображение типа  $V \times M$  или  $T \times O \times M$  на набор упорядоченных троек  $b_i = (t_j, o_i, m_k)$ , представляющих собой точки, в которых требуется осуществлять защиту в КИИ [3].

На рис. 3 представлена функциональная схема модели (1), которая показывает отношения между объектами КИИ, угрозами и СОБ. Из рис. 3 видно, что угрозы могут получить доступ к объектам КИИ, только пройдя «защитные барьеры», образуемые методами и средствами СОБ. Понятно, что максимальный уровень эффективности защитных барьеров достигается только тогда, когда для предотвращения угроз будут выбраны наиболее подходящие методы, средства или меры обеспечения безопасности.

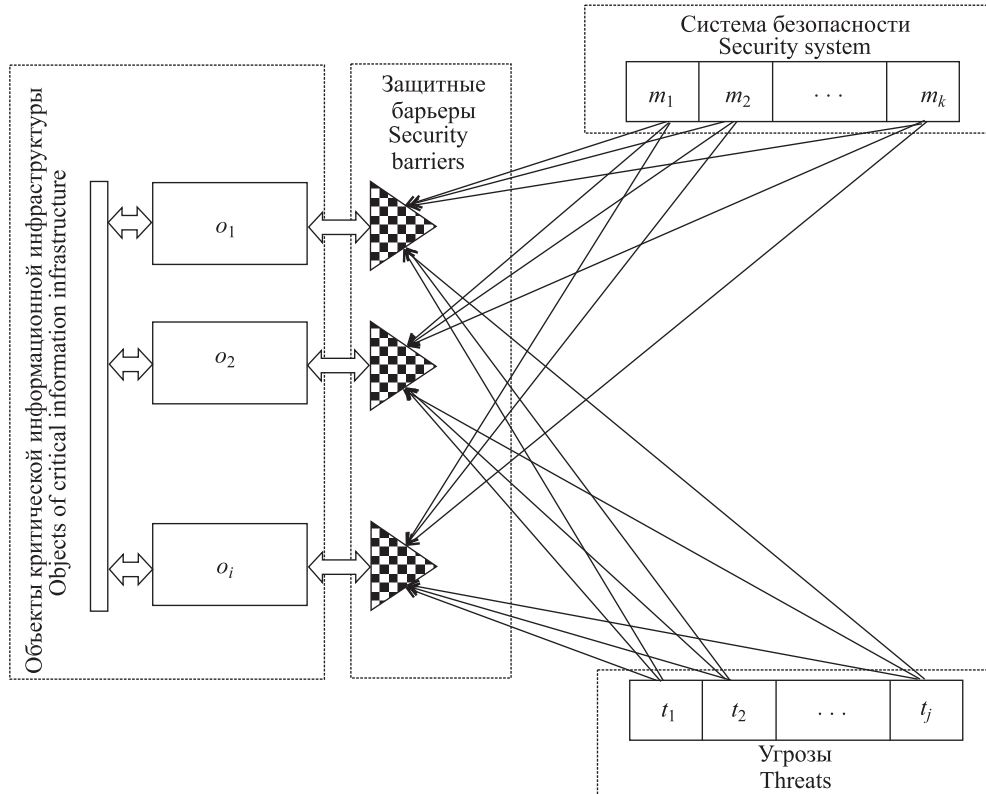


Рис. 3. Функциональная схема процесса информационной безопасности объектов критических инфраструктур

Fig. 3. Functional diagram of the process of information security of critical infrastructure objects

### Модель оптимальной структуры системы обеспечения безопасности

Пусть в рамках модели (1) даны:

- $P = \|p_{ij}\|_{I \times J}$ , где  $p_{ij}$  – вероятность или частота появления угрозы  $t_j$  относительно объекта  $o_i$ ;
- $Z = \|z_{ij}\|_{I \times J}$ , где  $z_{ij}$  – материальные расходы, требуемые для реализации необходимых методов и средств обеспечения безопасности объекта  $o_i$  от угрозы  $t_j$ ;
- $Z' = \|z'_{ij}\|_{I \times J}$ , где  $z'_{ij}$  – затраты, требуемые для устранения последствий угрозы  $t_j$ , причиненной объекту  $o_i$ ;
- $Q = \|q_{ij}\|_{I \times J}$ , где  $q_{ij}$  – материальный ущерб, наносимый в результате нарушения безопасности объекта  $o_i$  угрозой  $t_j$ ;
- $X = \|x_{ijk}\|_{I \times J \times K}$ , где  $x_{ijk} = 1$ , если объект  $o_i$  защищается с помощью средства защиты  $m_k$  от воздействие угрозы  $t_j$ ,  $x_{ijk} = 0$  – в противном случае.

Таким образом, задача определения оптимальной структуры системы обеспечения безопасности сводится к нахождению таких  $x_{ijk}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j = \overline{1, J}$ ,  $k = \overline{1, K}$ , которые минимизировали бы функционал

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J p_{ij} (z_{ij} + z'_{ij} + q_{ij}) x_{ijk} \rightarrow \min \quad (2)$$

и удовлетворяли условиям:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (z_{ij} + z'_{ij}) \leq Z_{\max}; \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ij} \geq 1, i = \overline{1, I}; \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} \geq 1, k = \overline{1, K}. \quad (5)$$

Функционал (2) показывает средневзвешенную величину материальных затрат на реализацию средств защиты и ущерба от нарушения безопасности объектов КИИ в целом. Условие (3) ограничивает объем общих затрат ( $\leq Z_{\max}$ ), требуемых для реализации необходимых методов и средств обеспечения информационной безопасности объектов КИИ и для ликвидации последствий угроз, (4) показывает, что каждый объект должен быть защищен хотя бы одним методом или средством защиты, а (5) – что каждый метод должен противостоять как минимум одной угрозе.

### Заключение

1. В результате исследований моделей и методов создания эффективной системы обеспечения безопасности для критической информационной структуры определена зависимость между потерями от угроз и стоимостью самой системы безопасности. Выяснено, что разработка всеобъемлющей системы обеспечения безопасности, стоимость которой намного выше, чем объем возможных потерь, не всегда приемлема (исключение – информационная безопасность в области национальной и государственной безопасности).

2. Предложена такая система обеспечения безопасности, структура которой является оптимальной, охватывает необходимые методы и средства обеспечения безопасности, но стоимость ее не превышает суммарный объем возможных потерь. Для этого решена задача оптимизации, которая дает средневзвешенную величину материальных затрат на разработку и реализацию методов и средств системы обеспечения безопасности и ущерба от нарушения безопасности системы в целом. При этом объем общих затрат, требуемых для реализации необходимых методов и средств обеспечения информационной безопасности объектов критической информационной структуры и для ликвидации последствий угроз, должен быть ограничен сверху, каждый объект – защищен, по крайней мере, одним средством защиты, а каждый метод должен противостоять хотя бы одной угрозе.

### Список литературы

1. Development of the Information Security System Effective Structure for the Distributed Computer Networks / V. A. Gasimov [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/537/5/052034/pdf>.
2. Knapp, E. Industrial Network Security. Securing Critical Infrastructure Networks for Smart Grid SCADA, and Other Industrial Control Systems. 2<sup>nd</sup> ed. / E. Knapp, J. Langill. Syngress Publ., 2014. 460 p.
3. Məmmədov, C. İ. Kritik İnfrastrukturlarda İnformasiya Təhdidlərinin və Risklərinin Təhlili, İnformasiyanın Qorunması İstiqamətlərinin Müəyyən Edilməsi / C. İ. Məmmədov, Z. M. Məmmədov, E. E. Bədəlov // Heydər Əliyev adına AANM-in Elmi Əsərlər Məcmuəsi. 2020. № 1 (на азербайджанском языке).
4. Баутов, А. Экономический взгляд на проблемы информационной безопасности / А. Баутов // Открытые системы. СУБД. 2002. № 2. <https://www.osp.ru/os/2002/02/181118/>.
5. Gasimov, V. A. Construction and Realization Methods of Effective Structures of Security Service Systems in Open Computer Networks / V. A. Gasimov // Abstract of the Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences. Baku, 1998. 26 p.
6. Аббасов, А. М. Проблемы информационной безопасности в компьютерных сетях / А. М. Аббасов, Р. М. Алгулиев, В. А. Касумов. Баку: Элм, 1998. 235 с.
7. Касумов, В. А. Разработка эффективной структуры системы безопасности информации для корпоративных компьютерных сетей / В. А. Касумов, С. З. Мамедов // Наукові праці Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова. 2007. № 2. С. 70–73.

### References

1. Gasimov V. A., Amashov Y. A., Aliyeva F. P., Mustafayeva E. A., Mutin D. I. Bolnokin V. E. (2019) Development of the Information Security System Effective Structure for the Distributed Computer Networks. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 537. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/537/5/052034/pdf>.
2. Knapp E., Langill J. (2014) *Industrial Network Security. Securing Critical Infrastructure Networks for Smart Grid SCADA, and Other Industrial Control Systems*. Syngress Publ. 2<sup>nd</sup> ed. 460.

3. Mammadov J. I., Mammadov Z. M., Badalov E. E. (2020) Analysis of Information Threats and Risks in Critical Infrastructures, Determination of Information Protection Directions. *Collection of Scientific Works of AAHM named after Heydar Aliyev*. (1) (in Azerb.).
4. Bautov A. (2002) An Economic View of the Problems of Information Security. *Open Systems. SMDB*. (2). <https://www.osp.ru/os/2002/02/181118/> (in Russian).
5. Gasimov V. A. (1998) Construction and Realization Methods of Effective Structures of Security Service Systems in Open Computer Networks. *Abstract of the Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences*. Baku. 26.
6. Abbasov A. M., Alguliev R. M., Gasimov V. A. (1998) *Problems of Information Security in Computer Networks*. Baku, Elm Publ. 235 (in Russian).
7. Gasimov V. A., Mamedov S. Z. (2007) Development of an Effective Structure of Information Security System for Corporate Computer Networks. *Scientific Works of the Odessa National Academy of Communications named after O. S. Popova*. (2), 70–73 (in Russian).

### **Вклад авторов / Authors' contribution**

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

#### **Сведения об авторах**

**Касумов В. А.**, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой компьютерных технологий Азербайджанского технического университета

**Мамедов Дж. И.**, к. т. н., доцент, доцент кафедры компьютерных технологий Азербайджанского технического университета

#### **Information about the authors**

**Gasimov V. A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Professor, Head at the Department of Computer Technologies of the Azerbaijan Technical University

**Mammadov J. I.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Technologies of the Azerbaijan Technical University

#### **Адрес для корреспонденции**

AZ 1073, Республика Азербайджан,  
г. Баку, просп. Г. Джавида, 25  
Азербайджанский технический университет  
Тел.: +994 12 539-11-38  
E-mail: gasumov@yahoo.com  
Касумов Вагиф Алиджавад

#### **Address for correspondence**

AZ 1073, Republic of Azerbaijan,  
Baku, H. Javida Ave., 25  
Azerbaijan Technical University  
Tel.: +994 12 539-11-38  
E-mail: gasumov@yahoo.com  
Gasimov Vagif Alijavad



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-104-113>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 004.056

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНОГО СОСТАВА ГЕНОМОВ КОРОНАВИРУСОВ

М. В. СПРИНДЖУК<sup>1,2,3</sup>, В. И. БЕРНИК<sup>1</sup>, А. С. ВЛАДЫКО<sup>5</sup>, ЧЖОЧЖУАН ЛУ<sup>4</sup>,  
Л. П. ТИТОВ<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Институт математики Национальной академии наук Беларуси (г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>3</sup>Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>4</sup>Китайский центр по контролю и профилактике заболеваний (г. Пекин, Китайская Народная Республика)

<sup>5</sup>Республиканский научно-практический центр эпидемиологии и микробиологии  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 30.01.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Экологические катастрофы, уменьшение площади лесных насаждений, одомашнивание диких животных, употребление в пищу зараженных животных, загрязнение воды и продуктов питания и их компонентов, эксперименты с вирусами, дефициты и дефекты иммунной системы у современного человека и других млекопитающих стали толчком к развитию новых опасных и особо опасных вирусов. Пандемия коронавируса, отнесенного к категории опасных вирусов, привела к повышению востребованности знаний и навыков вычислительной биологии, эпидемиологии и вирусологии в современном обществе. Существующие секвенаторы способны производить большие объемы биоинформационных данных, которые отображаются в виде геномных текстов. Сравнительный вычислительный анализ такой информации необходим для выяснения вопросов филогенеза, мутационного профилирования, молекулярной эволюции, определения вставок других геномов, аннотирования регионов геномов, поиска мишеней для разработки вакцин и фармакотерапии. В связи с этим авторами статьи проведен вычислительный эксперимент сравнительного анализа геномных текстов белорусских образцов коронавируса с рядом отобранных полных геномов опасных и особо опасных вирусов и коронавирусов различного происхождения. Анализ данных выполнен компьютерной программой YASS, геномные тексты загружали из GISAID, также был использован самостоятельно разработанный конвейер обработки геномных данных на основе биоинформационной платформы Galaxy. В результате анализа данных обнаружено значительное сходство нового коронавируса с рекомбинантным коронавирусом, частичное сходство с вирусами синтетического коронавируса, краснухи, Эбола 1976, ближневосточного респираторного синдрома, ВИЧ-2 (вируса иммунодефицита человека), вируса иммунодефицита обезьян и лихорадки Марбурга.

**Ключевые слова:** коронавирус, пандемия, биоинформатика, системы медицинского назначения, геномика, особо опасные инфекции, математическое моделирование, иммуноинформатика, противовирусная терапия.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проектов: Ф21МН-001 «Математическое моделирование передачи и распространения COVID-19 инфекции на основе систем дифференциальных уравнений и алгоритмов обработки данных с применением технологии машинного обучения», ГР 20213518 от 27.09.2021; M21COVID-026 «Ретроспективный анализ клинического и иммунологического статуса групп COVID-19 пациентов с сопутствующим туберкулезом и ВИЧ-инфекцией по данным РНПЦ пульмонологии и фтизиатрии г. Минска», ГР 20210456 от 31.03.2021; M21COVID-001 «Разработка и скрининг мукозной вакцины против COVID-19 на основе векторной платформы кишечного аденовируса», ГР 20210889 от 26.04.2021.



Для цитирования. Вычислительный анализ структурного состава геномов коронавирусов / М. В. Спринд-жук [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 2. С. 104–113. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-104-113>.

## COMPUTATIONAL ANALYSIS OF THE STRUCTURAL COMPOSITION OF CORONAVIRUS GENOMES

MATVEY V. SPRINDZUK<sup>1,2,3</sup>, VASSILI I. BERNIK<sup>1</sup>, ALEXANDER S. VLADYKO<sup>5</sup>,  
ZHUOZHANG LU<sup>4</sup>, LEONID P. TITOV<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)*

<sup>2</sup>*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

<sup>3</sup>*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)*

<sup>4</sup>*Chinese Center for Disease Control and Prevention (Beijing, People's Republic of China)*

<sup>5</sup>*The Republican Research and Practical Center for Epidemiology and Microbiology (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 30.01.2023

**Abstract.** Ecological disasters, wars in regions with microbiological weapons depots, deforestation, domestication of wild animals, consumption of infected animals, contamination of water and food products and their components, experiments with viruses, deficiencies and other defects of the immune system in modern humans and other mammals became the impetus for the evolution of new dangerous and extremely dangerous viruses. Due to the emergence of new dangerous viruses, the importance and demand for knowledge and skills of computational biology, epidemiology and virology in modern society have increased. Modern sequencers are capable of producing large amounts of bioinformatic data that is represented in the form of genomic texts. Comparative computational analysis of this information is necessary to clarify the issues of phylogenesis, mutational profiling, molecular evolution, identification of insertions of other genomes, annotation of genome regions, search for targets for vaccine development and pharmacotherapy. In this context, authors conducted a computational experiment of comparative analysis of the genomic texts of Belarusian coronavirus samples against a number of selected complete genomes of dangerous and extremely dangerous viruses and coronaviruses of various origins. Data analysis was performed using the YASS, genomic texts were downloaded from the GISAID, the custom genomic data processing pipeline based on the Galaxy bioinformatics platform was also applied. The article presents the results of an analysis of the available scientific literature and the computational experiment comparing the genomic texts of Belarusian coronavirus samples with a number of selected complete genomes of dangerous and especially dangerous viruses and coronaviruses of various origin. A significant similarity of the new coronavirus with the recombinant coronavirus, as well as partial similarity with synthetic coronavirus, Rubella, Ebola 1976, HIV-2 (human immunodeficiency virus), Middle East respiratory syndrome, simian immunodeficiency and Marburg fever viruses have been found.

**Keywords:** coronavirus, pandemic, bioinformatics, medical systems, genomics, especially dangerous infections, mathematical modeling, immunoinformatics, antiviral therapy.

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

**Gratitude.** The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research within the framework of the projects: F21MN-001 “Mathematical modeling of the transmission and spread of COVID-19 infection based on systems of differential equations and data processing algorithms using machine learning technology”, GR 20213518 dated 27.09.2021; M21COVID-026 “Retrospective analysis of the clinical and immunological status of groups of COVID-19 patients with concomitant tuberculosis and HIV infection according to the Republican Scientific and Practical Center for Pulmonology and Phthisiology in Minsk”, GR 20210456 dated 31.03.2021; M21COVID-001 “Development and screening of a mucosal vaccine against COVID-19 based on the intestinal adenovirus vector platform”, GR 20210889 dated 26.04.2021.

**For citation.** Sprindzuk M. V., Bernik V. I., Vladyko A. S., Zhuozhuang Lu, Titov L. P. (2023) Computational Analysis of the Structural Composition of Coronavirus Genomes. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 104–113. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-104-113> (in Russian).

### Введение

По причине значительной летальности и высокого уровня осложнений новая коронавирусная инфекция продолжает оставаться актуальным объектом для изучения с помощью современных методов медицинской кибернетики и прикладной математики на стыке различных наук, в том числе биофизики, биоинформатики и геномики, медицинского приборостроения и научного

программирования, системного анализа, вирусологии и молекулярной эпидемиологии. Вопросы структурного сходства геномных текстов новой коронавирусной инфекции между образцами-штаммами, полученными с одной географической территории, а также с референсными (эталонными) близкородственными геномами сообщаются и обсуждаются в серии недавних научных публикаций (табл. 1, 2) [1–3].

**Таблица 1.** Генетическая идентичность нового штамма коронавируса SARS-CoV-2 с различными CoV-штаммами [2]

**Table 1.** Genetic identity of a new SARS-CoV-2 coronavirus strain with different CoV strains [2]

Штамм вируса / Virus strain	Род вируса / Virus Genera	Идентичность, % / Identity, %
HCoV-229E	α	65,04
HCoV-NL63		65,11
HCoV-HKU1	β	67,59
HCoV-OC43		68,93
MERS-CoV		69,58
SARS-CoV		82,45
bat-SL-CoVZC		88,00
bat-SL-CoVZXC		88,00
SARS-HCoV Tor2		82,00
SARS-HCoV BJ01		82,00
SARSr-CoV; RaTG13		96,20

**Таблица 2.** Матрица процентной идентичности основных белков и доменов нового коронавируса SARS-CoV-2 в сравнении с другими бета-CoV [2]

**Table 2.** Percentage identity matrix for major proteins and domains of the new SARS-CoV-2 coronavirus compared to other beta-CoV [2]

Белок, домен / Protein, domain	Идентичность штаммов, % / Identity of strains, %			
	SARS-CoV	MERS-CoV	HCoV-HKU1	HCoV-OC43
Протеин S (Spike, шип)	97,71	32,79	30,50	31,26
Протеин E (Envelope, конверт)	96,00	36,00	28,00	20,00
Протеин M (Membrane, мембрана)	89,59	39,27	35,29	38,74
Протеин N (Nucleocapsid, нуклеокапсид)	85,41	48,47	34,28	35,20
Рецептор (ACE-2) binding domain (рецептор-связывающий домен ангиотензинпревращающего фермента (АПФ-2))	74,41	18,75	24,44	22,83
N-terminal domain (N-терминальный домен)	52,55	21,67	21,49	20,26

В ряде статей также излагаются идеи о возможных вставках в SARS-CoV-2 особо опасных вирусов, фрагментов генома человека, ретровирусов иммунодефицита человека и обезьян [4]. Безусловно, интересны гипотезы о структурном подобии (подразумевается на уровне нуклеиновых кислот и аминокислот) SARS-CoV-2 и синтетических и рекомбинантных вирусов. Более того, существуют гипотезы о вкладе в геном нового патогенного коронавируса и бактериальных геномов, как основных и наиболее значимых в эволюции современных опасных для человека микроорганизмов. Таким образом, целью научного исследования авторов статьи было проверить вышеуказанные гипотезы в серии вычислительных экспериментов и по данным современной научной литературы.

#### Методика проведения вычислительного анализа

Вычислительный эксперимент основывался на использовании программного средства YASS (Yet Another Sequence Similarity Search Software, еще одна программа для поиска сходства последовательностей). Это программное средство представляет собой инструмент для локального выравнивания/картирования (alignment/mapping) ДНК и РНК, основанный на эффективном

и чувствительном алгоритме фильтрации. Он находит наиболее вероятные консервативные мотивы при сравнении между гомологичными последовательностями, используя гибкие критерии совпадения для идентификации групп заданных секвенций [5]. Веб-интерфейс YASS на момент исследования был доступен для загрузки входных последовательностей в формате FASTA, запросов к программе и визуализации полученных результатов в нескольких формах (точечный график, табличный вывод и др.). В табличном выводе выравнивания сортируются в соответствии с их значением E-метрики и связаны с их текстовым представлением. Выходные данные YASS также можно загрузить в текстовом формате для дальнейшего анализа. Автономная версия доступна для загрузки с веб-страницы <https://github.com/laurentnoe/yass> [5].

Веб-сервис Genome detective [6, 7] применялся для идентификации мутационного профиля и гомологичности набора белорусских геномных последовательностей SARS-CoV-2 относительно эталонного китайского штамма, а также для выявления новых на момент исследования в Беларуси штаммов омикрон. Кроме того, применялся специально разработанный авторами конвейер анализа геномных данных, ранее опубликованный в [8].

### Результаты исследований и их обсуждение

В ходе вычислительного эксперимента выполнен анализ множества геномных текстов, полученных от пациентов на территории Беларуси. Были отобраны геномы из общедоступной базы данных GISAID (Global initiative on sharing all influenza data – Глобальная инициатива по обмену всеми данными о гриппе) (<https://www.epicov.org/>). Использовали программное обеспечение YASS [5], Genome Detective [6, 7], программные модули облачного сервиса Galaxy (<https://usegalaxy.eu/>).

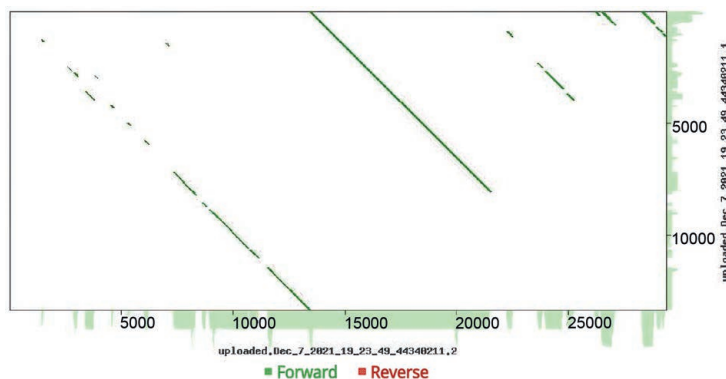
Гомологичность белорусских образцов с отдельно отобранными геномами вирусов представлена в табл. 3, а также приведены сгенерированные экстремумы баллов идентичности и энтропии, физико-математический базис которых представлен в документации и публикациях программного обеспечения YASS [5]. Сравнение белорусских образцов коронавируса SARS-CoV-2 с различными геномами с отображением на плоскости координат так называемыми точечными графиками (dot plots) приведено на рис. 1–8, где горизонтальные и вертикальные оси представляют собой прямоугольный массив нуклеотидов сравниваемых образцов. Результаты сходства геномов изображены в виде точек, где зеленые сегменты представляют выравнивания (фактически совпадения) прямых прочтений, а красные соответствуют выравниванию между комплементарными прочтениями одной последовательности и прямыми прочтениями другой [5].

**Таблица 3.** Гомологичность белорусских образцов с отдельно отобранными геномами вирусов из других семейств

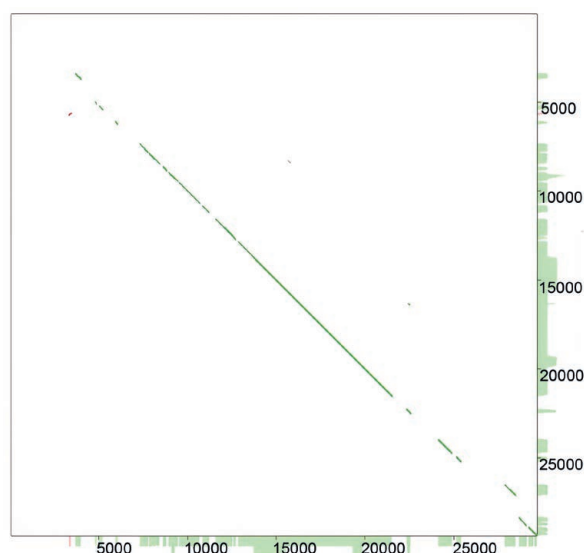
**Table 3.** Comparison of the homology of Belarusian samples with separately selected viruses of different origin and genera

Геном вируса / Virus genome	Балл идентичности /сходства / Identity / Affinity Score	Энтропия /Entropy
GomelSARS-CoV-2 <i>MW674675.1</i>	100919,00	5,78
SARS-CoV <i>AY278488.2</i>	74804,00	5,79
Recombinant CoV <i>FJ211859.1</i>	23018,00	5,66
Synthetic CoV <i>OK560913.1</i>	1584,00	5,54
Marburg <i>OL702894.1</i>	124,00	3,64
Rubella <i>KT962862.1</i>	114,00	4,01
Ebola1976 <i>AF086833.2</i>	108,00	3,92
MERS-CoV <i>JX869059.2</i>	96,98	5,64
HIV-2 <i>KU179861.1_</i>	90,00	3,46
SimianID <i>MW815971.1</i>	86,00	3,51

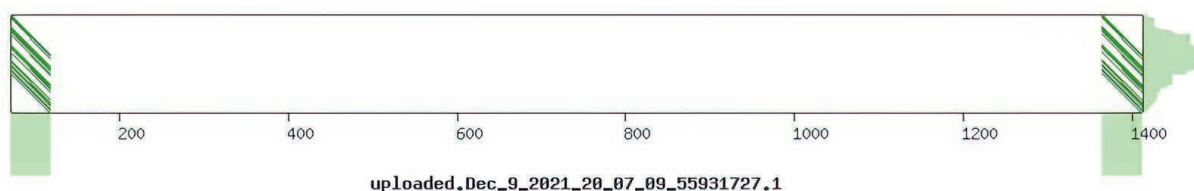
Примечание – Данные получены в результате экспериментов (ID = Immunodeficiency).



**Рис. 1.** Сравнение белорусских образцов коронавируса SARS-CoV-2 и генома рекомбинантного коронавируса  
**Fig. 1.** Comparison of Belarusian samples of SARS-CoV-2 coronavirus and the genome of recombinant coronavirus

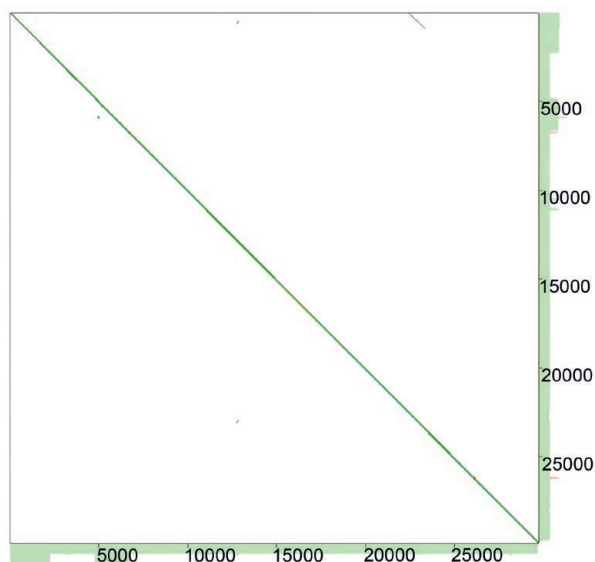


**Рис. 2.** Сравнение белорусских образцов коронавируса SARS-CoV-2 и генома MERS  
**Fig. 2.** Comparison of Belarusian samples of the SARS-CoV-2 coronavirus and the MERS genome

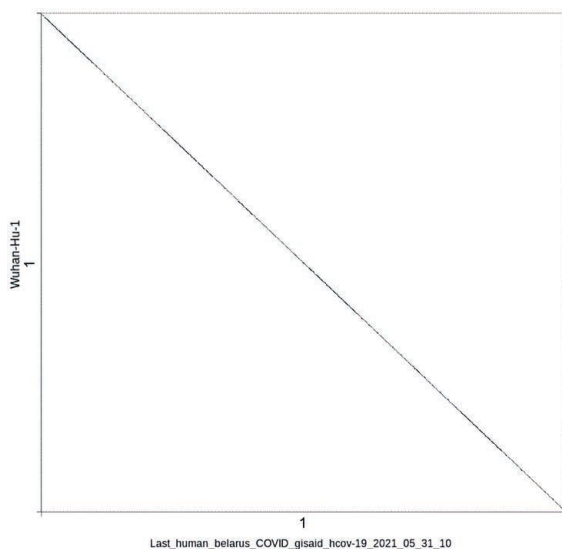


**Рис. 3.** Сравнение белорусских образцов коронавируса SARS-CoV-2 и генома Simian immunodeficiency virus (вируса иммунодефицита обезьян)  
**Fig. 3.** Comparison of Belarusian samples of the SARS-CoV-2 coronavirus and the genome Simian immunodeficiency virus (monkey immunodeficiency virus)

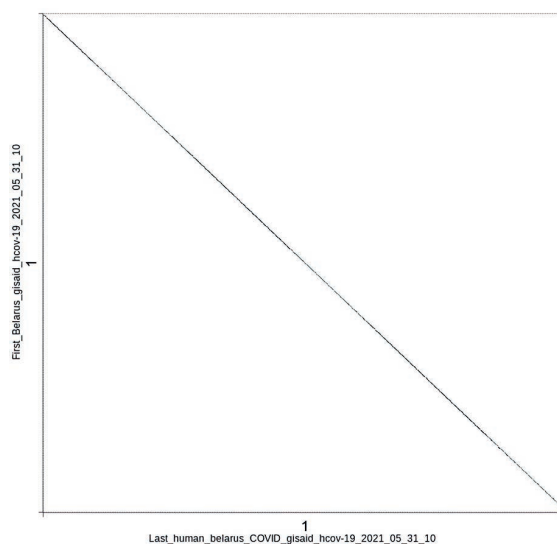
Точечные графики сравнивают две последовательности путем организации одной последовательности по оси  $X$ , а другой – по оси  $Y$ . Когда фрагменты обеих последовательностей совпадают в одном и том же месте на графике, в соответствующем месте рисуется точка. Последовательности могут быть записаны назад или вперед, однако последовательности на обеих осях должны быть записаны в одном направлении. Направление последовательностей на осях определяет направление линии на точечной диаграмме. Близость последовательностей по сходству определяет, насколько близка диагональная линия к графику, показывающему кривую, демонстрирующую прямую связь. На эту взаимосвязь влияют определенные особенности последовательности, такие как сдвиг кадров (рамки считывания), прямые повторы и инвертированные повторы. Сдвиги кадра включают вставки, делеции и мутации.



**Рис. 4.** Сравнение белорусских образцов коронавируса SARS-CoV-2 и генома SARS-CoV (выявлена наибольшая схожесть по сравнению со всеми другими небелорусскими образцами вирусов)  
**Fig. 4.** Comparison of Belarusian samples of SARS-CoV-2 coronavirus and the SARS-CoV genome (the greatest similarity was revealed compared to all other non-Belarusian virus samples)



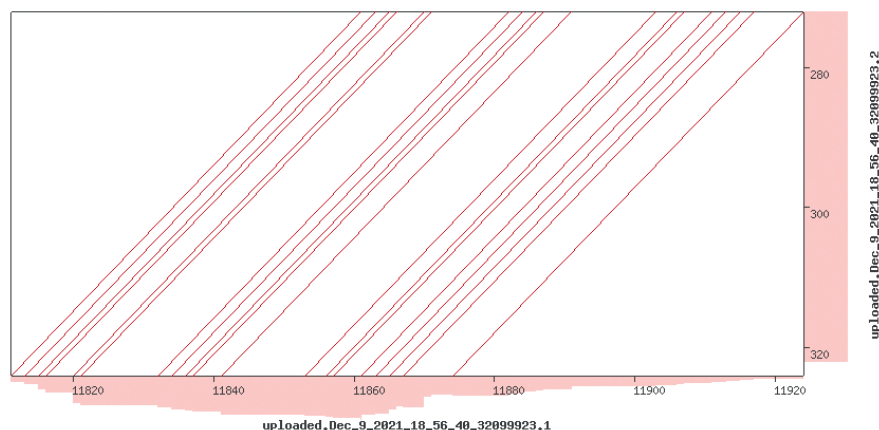
**Рис. 5.** Сравнение одного из последних просеквенированных геномов со ссылочным геномом-эталоном  
**Fig. 5.** Comparison of one of the latest sequenced genomes with a reference genome



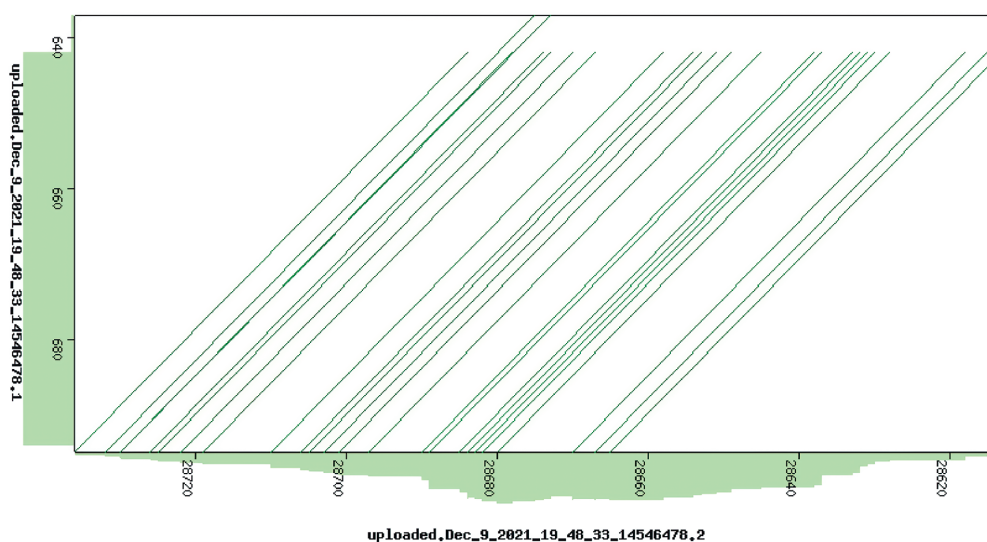
**Рис. 6.** Сравнение первого и последнего просеквенированных белорусских геномов SARS-CoV-2 между собой  
**Fig. 6.** Comparison between the first and the last sequenced Belarusian SARS-CoV-2 genomes

По результатам вычислительного эксперимента выявлены значительная гомологичность нового коронавируса с рекомбинантным коронавирусом, частичное сходство с вирусами синтетического коронавируса, Марбурга, краснухи, Эбола 1976, ВИЧ-2, вируса иммунодефицита обезьян. Белорусские вирусы оказались предельно идентичными изоляту из метагенома, полученного в Гомеле (данными поделился Е. В. Воропаев, 2021 [9]), и структурно самоподобными, что означает их высокую (более 98 %) структурную гомологию на данной географической территории.

По данным современной научной литературы, результаты сравнительного геномного анализа SARS-CoV-2 и SARS-CoV выявили чрезвычайно высокую гомологию между двумя штаммами на уровне нуклеотидов.



**Рис. 7.** Сравнение белорусских образцов коронавируса SARS-CoV-2 и генома ВИЧ-2  
**Fig. 7.** Comparison of Belarusian samples of SARS-CoV-2 coronavirus and HIV-2 genome



**Рис. 8.** Сравнение белорусских образцов коронавируса SARS-CoV-2 и генома вируса Эбола 1976  
**Fig. 8.** Comparison of Belarusian samples of SARS-CoV-2 coronavirus and the 1976 Ebola virus genome

Тем не менее геномы этих двух штаммов отличаются друг от друга в нескольких регионах. Шиповидный ген SARS-CoV-2 демонстрирует большую гомологию с геномами коронавирусов летучих мышей, тогда как два дополнительных гена 3А и 8В обладают гомологией с SARS-CoV. Протеомный анализ сходства SARS-CoV и SARS-CoV-2 показал, что большинство белков в высокой степени (95–100 %) гомологичны. Протеазы RdRp и 3CLpro имеют более 95 % сходства последовательностей, хотя на уровне генома эти два штамма сходны только на 82 %. Перечисленные доказательства предполагают общую эволюционную историю обоих вирусных штаммов. Однако SARS-CoV-2 обладает двумя белками (ORF8 и ORF10), которые не имеют гомологии со штаммом SARS-CoV. Консервативные последовательности ORF8 для SARS-CoV отличаются от аминокислотной последовательности ORF8, полученной для SARS-CoV-2 [5].

Ряд исследований предполагают тесную связь между SARS-CoV-2 и SARS-CoV с возбудителем SARS у летучих мышей CoV. Анализ структурно-функциональных различий между SARS-CoV-2 и SARS-CoV может быть полезным ввиду выявления отдельных аминокислотных замен в определенных белках. Всего обнаружено 380 аминокислотных замен у SARS-CoV-2 при сравнении с SARS-CoV. Оболочка, матрикс или вспомогательные белки р6 и 8b, nsp7 и nsp13 не выявили изменений аминокислотной последовательности. В неструктурных белках nsp2 и nsp3 обнаружена одиночная аминокислотная замена в положении 61 и 102 соответственно. Кроме того, в шиповидном белке было обнаружено 27 аминокислотных замен длиной 1273 аминокислот, в том числе аминокислотный регион 357–528 в RBD (рецептор-связывающем домене) с шестью заменами, и еще шесть замен в аминокислотной области 569–655 в основном субдомене (SD). Кро-

ме того, в С-конце домена S1 рецептор-связывающей субъединицы обнаружили четыре замены (Q560L, S570A, F572T и S575A). Рецептор-связывающие мотивы, взаимодействующие с человеческим АПФ-2 рецептором (ангиотензин превращающего фермента), оказались точно гомологичны фрагменту генома штамма SARS-CoV-2 практически без отличий в виде аминокислотных замен. По мнению авторов [2], из-за ограниченных знаний о SARS-CoV-2 разумные объяснения этих аминокислотных замен пока неизвестны.

Прямое зоонозное происхождение SARS-CoV-2 не установлено. Однако теоретические сравнительные исследования генетических последовательностей комплекса коронавируса выявили высокое сродство этого вируса с возбудителем SARS китайских летучих мышей (SARSr-CoV, RaTG13), поскольку он на 96,2 % имеет с ним генетическую гомологию. Несмотря на высокий уровень генетического сходства нового вируса SARS-CoV-2 по сравнению с другими штаммами CoV, обнаружено, что геном SARS-CoV-2 содержит несколько отличительных характеристик, таких как мутации в области S1-S2 рецептор-связывающего домена многоосновного фурина (сайт расщепления фурина, furin cleavage sites) и о-связанные гликаны. Регионы отличия различных штаммов коронавируса имеют значение для разработки лекарств, поскольку эти геномные вариации могут быть причиной повышенной заразности и тяжести заболевания. Таким образом, перепрофилирование лекарств/вакцин в настоящее время является актуальной областью исследований. Ученые стремятся использовать последовательности нуклеотидов и аминокислот антигенов-мишеней ранее известных штаммов коронавируса, чтобы разработать вакцину и лекарственные средства для нового штамма SARS-CoV-2. Гликопротеин S (спайк, шип) отвечает за опосредование проникновения вируса в клетки человека и таким образом определяет вирусную заразность и возможности распространения среди различных млекопитающих. Ограничение его расщепления и манипуляции с экспрессией рецептора АПФ-2 могут стать эффективной терапией. Более того, S-белок является наиболее потенциальным антигенным сайтом-мишенью [2].

### Заключение

1. Данные вычислительных экспериментов и научных работ свидетельствуют о том, что новый коронавирус гомологичен другим коронавирусам, особенно SARS-CoV и рекомбинантному коронавирусу, и имеет вставки молекулярных мотивов из геномов опасных и особо опасных вирусов: иммунодефицита обезьян и человека, Эбола, других микроорганизмов. Происхождение такого структурного ансамбля по-прежнему неизвестно. Необходимо дальнейшее изучение (аннотирование, распознавание структурного состава и потенциальных функций, сопоставление с другими массивами данных) вставок геномов опасных и особо опасных вирусов для выяснения происхождения и природы коронавирусной пандемии и разработки стратегий и технологий противостояния вирусным эпидемиям.

2. Предмет изучения идентичности и гомологичности геномных текстов SARS-CoV-2 должен стать темой отдельного научного проекта и основанием для разработки новых методик и алгоритмов анализа биоинформационных данных.

3. Функции программного обеспечения, апробированного в рассмотренном вычислительном эксперименте, можно использовать в разрабатываемой авторами автоматизированной системе анализа биоинформационных данных геномной природы.

### Список литературы

1. Behbahani, M. Analysis and Comparison of Physicochemical Properties, Mutations and Glycosylation Patterns between RNA Polymerase and Membrane Protein of SARS-CoV and SARS-CoV-2 / M. Behbahani, P. Rabiei, H. Mohabatkar // *Molecular Biology Research Communications*. 2021. Vol. 10, No 4. P. 171–178. Doi: 10.22099/mbrc.2021.42187.1692.
2. Genetic Comparison Among Various Coronavirus Strains for the Identification of Potential Vaccine Targets of SARS-CoV-2 / N. Kaur [et al.] // *Infection, Genetics and Evolution*. 2021. Vol 89. Doi: 10.1016/j.meegid.2020.104490.
3. Макаров, Л. М. Сравнительный анализ штаммов коронавируса / Л. М. Макаров, Д. О. Иванов, А. В. Поздняков // *European Science*. 2020. Т. 53, № 4. С. 61–66.
4. Харченко, Е. П. Коронавирус SARS-CoV-2: особенности структурных белков, контагиозность и возможные иммунные коллизии / Е. П. Харченко // *Эпидемиология и вакцинопрофилактика*. 2020. Т. 19, № 2. С. 13–30. <https://doi.org/10.31631/2073-3046-2020-19-2-13-30>.

5. Noé, L. YASS: Enhancing the Sensitivity of DNA Similarity Search / L. Noé, G. Kucherov // *Nucleic Acids Research*. 2005. Vol. 33. P. W540–W543. <https://doi.org/10.1093/nar/gki478>.
6. Genome Detective: an Automated System for Virus Identification from High-Throughput Sequencing Data / M. Vilsker [et al.] // *Bioinformatics*. 2019. Vol. 35, Iss. 5. P. 871–873. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bty695>.
7. Genome Detective Coronavirus Typing Tool for Rapid Identification and Characterization of Novel Coronavirus Genomes / S. Cleemput [et al.] // *Bioinformatics*. 2020. Vol. 36, Iss. 11. P. 3552–3555. Doi: 10.1093/bioinformatics/btaa145.
8. Автоматизированный конвейер анализа данных геномов коронавируса / М. В. Спринджук [и др.] // *Медэлектроника-2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. статей XIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 8–9 дек. 2022 г. Минск: Белор. госуд. ун-т информ. и радиоэлек., 2022. С. 60–65.*
9. Воропаев, Е. В. Опыт использования современных геномных технологий для изучения микроорганизмов и их сообществ / Е. В. Воропаев, И. О. Стома, Д. В. Тапальский // *Проблемы здоровья и экологии*. 2021. Т. 18, № 3. С. 159–167.

## References

1. Behbahani M., Rabiei P., Mohabatkar H. (2021) Analysis and Comparison of Physiochemical Properties, Mutations and Glycosylation Patterns between RNA Polymerase and Membrane Protein of SARS-CoV and SARS-CoV-2. *Molecular Biology Research Communications*. 10 (4), 171–178. Doi: 10.22099/mbrc.2021.42187.1692.
2. Kaur N., Singh R., Dar Z., Bijarnia R. K., Dhingra N., Kaur T. (2021) Genetic Comparison Among Various Coronavirus Strains for the Identification of Potential Vaccine Targets of SARS-CoV-2. *Infection, Genetics and Evolution*. 89. Doi: 10.1016/j.meegid.2020.104490.
3. Makarov L. M., Ivanov D. O., Pozdnyakov A. V. (2020) Comparative Analysis of Coronavirus Strains. *European Science*. 53 (4), 61–66 (in Russian).
4. Kharchenko E. P. (2020) Coronavirus SARS-CoV-2: Features of Structural Proteins, Contagiousness and Possible Immune Collisions. *Epidemiology and Vaccine Prevention*. 19 (2), 13–30. <https://doi.org/10.31631/2073-3046-2020-19-2-13-30> (in Russian).
5. Noé L., Kucherov G. (2005) YASS: Enhancing the Sensitivity of DNA Similarity Search. *Nucleic Acids Research*. 33, W540–W543. <https://doi.org/10.1093/nar/gki478>.
6. Vilsker M., Moosa Y., Nooij S., Fonseca V., Ghysens Y., Dumon K., Pauwels R., Alcantara L. C., Eynden E. V., Vandamme A.-M., Deforche K., de Oliveira T. (2019) Genome Detective: an Automated System for Virus Identification from High-Throughput Sequencing Data. *Bioinformatics*. 35 (5), 871–873. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bty695>.
7. Cleemput S., Dumon W., Fonseca V., Wasim A. K., Giovanetti M., Alcantara L. C., Deforche K., de Oliveira T. (2020) Genome Detective Coronavirus Typing Tool for Rapid Identification and Characterization of Novel Coronavirus Genomes. *Bioinformatics*. 36 (11), 3552–3555. Doi: 10.1093/bioinformatics/btaa145.
8. Sprindzuk M. V., Bernik V. I., Kalosha N. I., Vladyko A. S., Ulzyibat B., Batgerel B., Titov L. P., Klimuk D. A., Skriahina E. M., Skriahin A. E., Glinskaya T. N. (2022) Automated Data Analysis Pipeline for Coronavirus Genomes. *Medeelectronics-2022. Means of Medical Electronics and New Medical Technologies, Collection of Scientific Articles XIII International Scientific and Technical Conference, Minsk, 8–9 Dec. 2022. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics Publ.* 60–65 (in Russian).
9. Voropaev E. V., Stoma I. O., Tapalsky D. V. (2021) Experience of Modern Genomic Technologies Application for the Study of Microorganisms and their Communities. *Problems of Health and Ecology*. 18 (3), 159–167 (in Russian).

## Вклад авторов

Спринджук М. В. создал концепцию статьи, выполнил вычислительный эксперимент и написал основной текст.

Берник В. И., Владыко А. С., Чжочжуан Лу, Титов Л. П. консультировали Спринджук М. В. по вопросам математики и иммунологии, проверяли рукопись, написанную Спринджук М. В., участвовали в написании текста заявок научных проектов, при поддержке которых выполнено данное научное исследование.



### Authors' contribution

Sprindzuk M. V. created the concept of the article, performed a computational experiment and wrote the core text.

Bernik V. I., Vladyko A. S., Zhuozhuang Lu, Titov L. P. advised Sprindzuk M. V. on questions of mathematics and immunology, checked the manuscript written by Sprindzhuk M. V., participated in writing the text of proposal applications for scientific projects, with the support of which this research was done.

### Сведения об авторах

**Спринджук М. В.**, к. т. н., старший научный сотрудник Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси, Института математики НАН Беларуси, докторант кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Берник В. И.**, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник отдела теории чисел Института математики НАН Беларуси

**Владыко А. С.**, д. м. н., профессор, главный научный сотрудник Республиканского научно-практического центра эпидемиологии и микробиологии

**Чжочжуан Лу**, д. м. н., профессор, главный научный сотрудник Китайского центра по контролю и профилактике заболеваний

**Титов Л. П.**, академик НАН Беларуси, д. м. н., профессор, заведующий лабораторией экспериментальной иммунологии Республиканского научно-практического центра эпидемиологии и микробиологии

### Адрес для корреспонденции

220012, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Сурганова, 6  
Объединенный институт  
проблем информатики НАН Беларуси  
Тел.: +375 33 682-57-55  
E-mail: bioinformatics\_bel@yahoo.com  
Спринджук Матвей Владимирович

### Information about the authors

**Sprindzuk M. V.**, Cand. of Sci., Senior Researcher at the United Institute of Informatics Problems of the NAS of Belarus, the Institute of Mathematics of the NAS of Belarus, Dr. Student at the Department of Electronic Computing Media of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Bernik V. I.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Principal Researcher at the Department of Number Theory of the Institute of Mathematics of the NAS of Belarus

**Vladyko A. S.**, Dr. of Sci. (Med.), Professor, Principal Researcher at the Republican Research and Practical Center for Epidemiology and Microbiology

**Zhuozhuang Lu**, Dr. of Sci. (Med.), Professor, Principal Researcher of the Chinese Center for Disease Control and Prevention

**Titov L. P.**, Academic of the NAS of Belarus, Dr. of Sci. (Med.), Professor, Head of Laboratory of Experimental Immunology of the Republican Research and Practical Center for Epidemiology and Microbiology

### Address for correspondence

220012, Republic of Belarus,  
Minsk, Surganova St., 6  
The United Institute  
of Informatics Problems of the NAS of Belarus  
Tel.: +375 33 682-57-55  
E-mail: bioinformatics\_bel@yahoo.com  
Sprindzuk Matvey Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-114-120>

*Original paper*

UDC 004.912.5

## VOICE DETECTION USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

ULADZIMIR A. VISHNIAKOU, SHAYA BANAA H.

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

*Submitted 24.08.2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023

**Abstract.** The article presents an approach, methodology, the software system based on a machine learning technologies for convolutional neural network and its use for voice (cough) recognition. Tasks of article are receiving evaluating a voice detection system with deep learning, the use of a convolutional neural network and Python language for patients with cough. The convolutional neural network has been developed, trained and tested using various datasets and Python libraries. Unlike the existing modern works related to this area, proposed system was evaluated using a real set of environmental sound data, and not only on filtered or separated voice audio tracks. The final compiled model showed a relatively high average accuracy of 85.37 %. Thus, the system is able to detect the sound of a voice in a crowded public place, and there is no need for a sound separation phase for pre-processing, as other modern systems require. Several volunteers recorded their voice sounds using microphones of their smartphones, and it was guaranteed that they would test their voices in public places to make noise, in addition to some audio files that were uploaded online. The results showed an average recognition accuracy – of 85.37 %, a minimum accuracy – of 78.8 % and a record – of 91.9 %.

**Keywords:** voice detection, convolution neural network, machine learning-based dataset, audio files.

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

**For citation.** Vishniakou U. A., Shaya B. H. (2023) Voice Detection Using Convolutional Neural Network. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 114–120. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-114-120>.

## РАСПОЗНАВАНИЕ ГОЛОСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЁРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В. А. ВИШНЯКОВ, Б. Х. ШАЙЯ

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

*Поступила в редакцию 24.08.2022*

**Аннотация.** Представлены подход, методология, программная система, основанные на свёрточной нейронной сети, для распознавания голоса (кашля) в условиях зашумленности с использованием технологий машинного обучения. Разработана и оценена система распознавания кашля на основе машинного обучения, использования свёрточной нейронной сети и библиотек языка Python. Свёрточная нейронная сеть протестирована с помощью различных наборов данных и библиотек. В отличие от существующих современных работ в этой области предложенная система оценивалась с применением реального набора звуковых данных окружающей среды, а не только отфильтрованных или разделенных звуковых параметров голоса. Окончательная скомпилированная модель показала относительно высокую среднюю точность – 85,37 %. Предлагаемая система способна распознавать звук голоса в многолюдном общественном месте, и нет необходимости в фазе разделения звука для предварительной обработки, как в других системах. Несколько добровольцев записали звуки своего голоса с помощью смартфонов. Затем они протестировали свои голоса в общественных местах на предмет шума в дополнение к некоторым аудиофайлам, которые были загружены онлайн. Результаты показали среднюю точность распознавания – 85,37 %, минимальную – 78,8 % и рекордную – 91,9 %.

**Ключевые слова:** распознавание голоса, свёрточная нейронная сеть, набор данных на основе машинного обучения, аудиофайлы.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Для цитирования.** Вишняков, В. А. Распознавание голоса с использованием свёрточной нейронной сети / В. А. Вишняков, Б. Х. Шайя // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 2. С. 114–120. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-114-120>.

## Introduction

The integration of information technology into the healthcare domain was a point of interest, as well as a sensitive domain in which people lives are involved. However, technology gave us a great advance in detecting, diagnosing, and treating diseases, as well as speeding and facilitating the huge work of people working in this domain. Patient monitoring tools, scanning tools (X-ray, MRI, etc.), electronic tools, are all examples of the advantages of this interference. But what seems interesting, and according to a study would experience, is automating the healthcare domain, by making early detection, accurate diagnosis, choosing the medicine, or sharing in surgeries [1].

There is published a study on the deadliest diseases in July 2019, and lower respiratory infections come in the third rank, which affect lungs and airways related infection. Lower respiratory infections are considered contagious such as influenza, pneumonia, bronchitis, and tuberculosis in addition to the new virus COVID-19 which affected the whole world. Early detection of such diseases can prevent the spread in a society and help in controlling the infections besides treating them. All the aforementioned diseases share coughing as a common symptom, yet, cough sound is unique for each one of these diseases and diagnosis of the infection can be done from listening to the cough sound.

COVID-19 was a motivation for researchers to involve machine learning, deep learning, and artificial intelligence in detecting infections to stop its high speed spreading around all regions, inspired by others, cough detection was also a point of interest for many researchers before COVID-19 pandemic. In article [2] it is stated that 93 papers related to cough detection and classification were found between 2012 and 2021 which indicates the huge interest of researchers in this domain and the benefits that comes from the detection of cough sound or the type of cough. Their survey is also focused on the method that are used to classify cough sounds and the obtained results of different approaches. Artificial neural networks, convolutional neural networks, k-Nearest Neighbor, and Deep neural network are an example of the methods used in the approaches either to detect coughing or to diagnose cough.

## Task statement

Respiratory diseases are known as a common cause for death around the world. “The Global Impact of Respiratory Disease”, a report published by the Forum of International Respiratory Societies, shows very concerning numbers and statistics of deaths and infections caused by the respiratory and lung diseases. Around 3 million people die each year from chronic obstructive pulmonary disease (COPD) only, and asthma affects more than 334 million people, especially children, adding to them acute lower respiratory tract infections that take the third rank in death causalities, not to mention tuberculosis that has 1.4 million died, as well lung cancer the causes death of more than 1.6 million annually. All the aforementioned respiratory diseases share more than one symptom; cough is one of the mutual symptoms and an illness can be diagnosed by the cough sound.

Cough is divided into two types, acute that happens suddenly because of flu or cold, and chronic which is more serious and lasts for months. Medics depend on their diagnosis on the sound of a cough when it is related to respiratory infections, because cough sound is unique for every disease, therefore detecting the sound can prevent complications and the spread of the illness. According to what mentioned above from the serious danger of respiratory diseases and the first diagnosis step it is important to find a solution that can detect cough sound among other sounds to control the infections especially in crowded places such as train stations, airports, libraries, universities, etc. Thus taking the advantage of artificial intelligence seems to be important to detect cough sounds in an accurate and fast manner by using machine learning technologies.

Manual detection of cough sound seems to be easy when it happens in a clinic, however when infected people don't realize their diseases or they don't care about other's health, they could travel in planes,

trains or share restaurants or libraries with others. So the need raises for automated cough detection in a crowd of people. The main objective of this work is to develop a well-trained machine learning model that will be able to distinguish cough sounds from many other environmental sounds, for the sake of slowing or preventing the spread of the respiratory diseases in public environments.

The first step for implementing a machine learning model is selecting the dataset in order to select the suitable method accordingly. The used dataset was Environmental sound classification (ESC) a public dataset that is labeled according to the sound type. This dataset includes cough sounds in addition to many others in the form of WAV. The model (neural network) was built and trained on this data set. Python programming language was used to generate this model with the help of deep learning and data science libraries as “Numpy” and “Keras”. The results of the model study showed an improvement in performance after training and testing, recognition increased from 72 to 85 %.

### Design of system for cough detection

The proposed system is designed to make classifications and detect cough sounds. There are four main stages after selecting the sound classification dataset (Fig. 1). The first stage is extracting the features from audio files such as the MFCCs, Chromagram, Mel-spectrogram, Spectral contrast, and Tonal centroid features. The second stage is labeling stage, here we categorize the sound samples into cough and non-cough, then we feed the inputs into the convolutional neural network (CNN). Next, we reach the training stage and record the results until we reach the optimal parameters according to the best results (changing epoch number, learning rate, etc.). The final stage, after generating the model, is to conduct several tests on recorded sounds from volunteers.

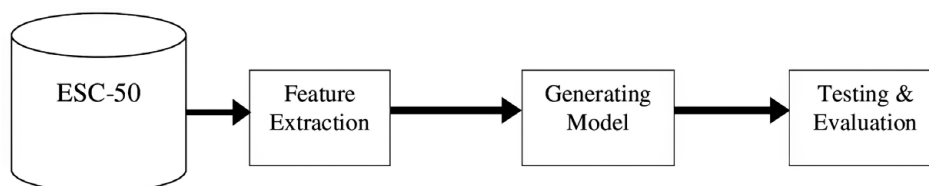


Fig. 1. Proposed system architecture

In general, a dataset is a matrix or database that contains rows and columns that defines a unit, or an object to be analyzed by computers. Columns defines the features or patterns of the object and each row represent a unique entity. Sounds can't be represented in a dataset directly since there are features to be extracted and represented numerically in order to analyze and process them. However, public sound classification datasets come in the form of audio files (WAV, MP3), and its features are extracted manually to meet data scientists and researchers requirements. Environmental sound classification dataset is a collection of 2000 sound files that represent 50 types of environmental sounds. ESC-50 was published in 2015 and used in many publications and systems. Sounds included in ESC have limited background noise since they were in the foreground. The dataset contains animal sounds, natural soundscapes and water sounds, human sounds (non-speech), urban noises, internal sounds. When the data was collected and processed the duration was fixed to 5 s for each audio event where some of them were initially less than the fixed time, they got padded with silence. The sampling frequency was unified to 44.1 KHz as well as the Ogg Vorbis compression set at 192 Kbit/s. More than 50 proposals and approaches using machine learning and signal processing are evaluated and tested on the ESC-50 [4–6]. ESC-50 was used for this research and downloaded from Kaggle website for data scientists that contains more than 50 000 datasets in addition to more than 400 000 public notebooks. Users can access Kaggle using their Google accounts to work in the cloud space offered to them.

### Processing of sound in system

The first step before generating DL model, is – preprocessing. The dataset should be cleaned from noise, empty rows, and redundancy, in addition feature extraction methods are important to be done in order to get the important features. Since this dataset is an audio dataset, we used Librosa library to extract the features we mentioned before using functions included in the library. The code is designed to read files that are in \*.WAV or \*.OGG formats, from a specific folder, then enumerate every sound file and extract its features (STFT, MFCC, Mel-spectrogram, Chroma, Spectral contrast, and Tonnetz), and finally parse them in an array using NumPy.

Here are the functions used from the Libfor library. The first function *extracted\_feature()*, used to extract characteristics, returns the average value of each of them as a floating-point number. The function *parse\_audio\_files()* is used to read audio files from a specific directory and extract the features for every audio file in .WAV or .OGG formats and stack the results in an array. After extracting features (function *get\_ext\_features()*), a user can get the features for any audio file, that was extracted before. Hickle library was used to save the extracted features in order to save time and to use the saved features every time we need them. So, using dump function to save the features in data format (\*.HKL) and load function to get them from the directory.

### Construction of convolutional neural network system

After extracting the features from audio files and saving them, the CNN now is ready to be fed from the built dataset. The architecture of the CNN is as follows (Fig. 2).

1. The input layer that has the parameter input shape 193.1 referred to the number of features within the dataset. The input layer is convolutional 1-dimension layer with 64 filters and a window (kernel) of size 3. Using the activation function ReLU (Rectified Linear Activation Function), which is a linear function to set negative inputs to zero, whereas positive ones remains the same. And it became the default function for it easiness and high performance results obtained for models using it in neural networks.

2. Two convolutional 1-D layers are implemented after the input layer with 64 filters and kernel of size 3 using ReLU as the activation function.

3. The following layer is the max pooling layer used to down sample the input, and it is used with pool size 3 where the output result will be the input shape (193.1) subtracted from the pool size and added to 1 then divided by the number of strides which default is 1.

4. Two convolution layers with the same activation function are added with 128 filters and kernel of size 3.

5. As a replacement of the fully connected layer, global average pooling layer is added to the CNN, since using the fully connected layer could result in an over-fitted model. Global average pooling layer will generate one feature map related to each category in cough detection system and create a bridge between the previous convolutions and the normal neural network.

6. To prevent over fitting regularization methods are implemented before training the neural network. One method for regularization is to dropout the contribute in reducing interdependent learning between the neurons. During the training phase within every iteration and hidden layer the model will ignore a random fraction of nodes (in our case it is 1/2).

7. Finally, the dense layer, which is the deep neural network that is each neuron is connected to all previous neurons. The dense layer will output finally the results according to the number of classes found in the dataset which are in our case early 49. The activation function used in this network is Softmax which is a probabilistic function that turns vector of numbers to one of the probabilities. The values obtained for each class from the 49 classes will be normalized to 1 using the Softmax activation function.

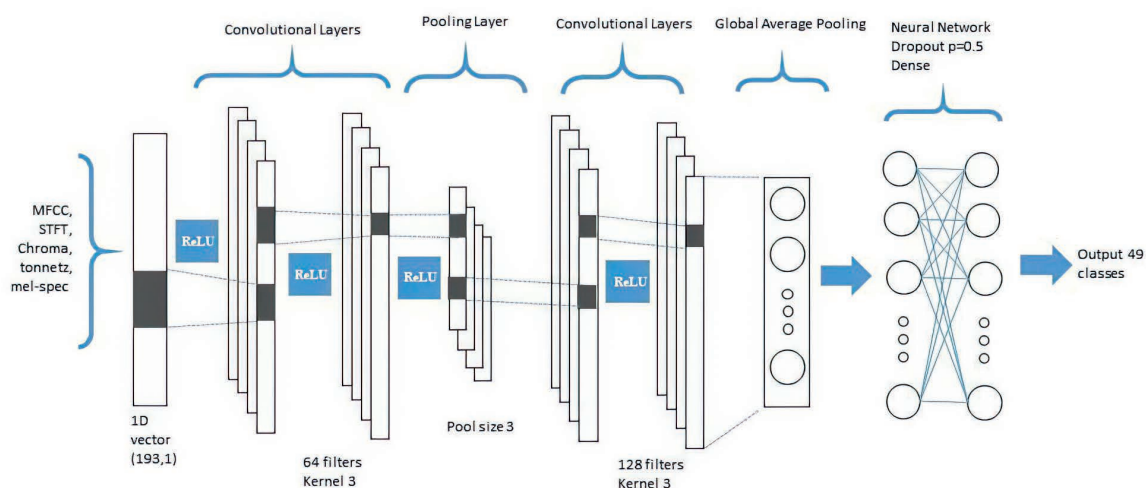


Fig. 2. Architecture of the convolutional neural network

Keras library offers training and testing functions for the given dataset. Some parameters need to be set for the neural network to get the highest performance results. The function “train” accepts the following parameters: features, labels, type, number of classes, epochs, and optimizer. Neural network adjusts its weights according to the results obtained after each iteration using different algorithms known as optimizers which implies calculations on the difference between the results. The implemented network uses the stochastic gradient descent or SGD as the optimizer for its simplicity that calculates the gradient of the network loss function. An initial learning rate for this system was 0.1 with momentum 0.9. The features are those saved using Hickle and the labels as well. The number of epochs usually needs to be changed to get the best results, and we increased the number of epochs from 300 to 500, 750, 1200, and finally 1500. After training stage ended up, the model was saved in \*.h5 format, that was used for predicting new sound files. For prediction some sounds were tested and classified using the “predict” function in addition to some recorded cough sounds from volunteers. Prediction method was implemented using a loop to iterate several sound files and output the detected result accuracy for the top three classes that got the highest results.

STFT, MFCC, Mel-Spectrogram, Chromagram, Tonnetz, and Spectral contrast were the features and feature extraction methods applied to get a numerical array in order to compute the DL algorithm. 193 features as total were extracted using Librosa from all the above mentioned methods and resulted in a data-frame that contained 1977 rows and 193 columns from all the input data.

Since we are using the CNN that takes features from images these features were also displayed as images, yet, we take a cough sound as an example for demonstration to show the features as 2D images in Fig. 3. On it the X-axis represents the time for the voice recorded in seconds and the Y-axis represents frequency (the first image at the left), the second image is the MFCC where the Y-axis represents the Cepstral coefficients, the third image shows the Chromagram in terms of frequency and time, and the last images represent the Tonnetz and the Spectral contrast.

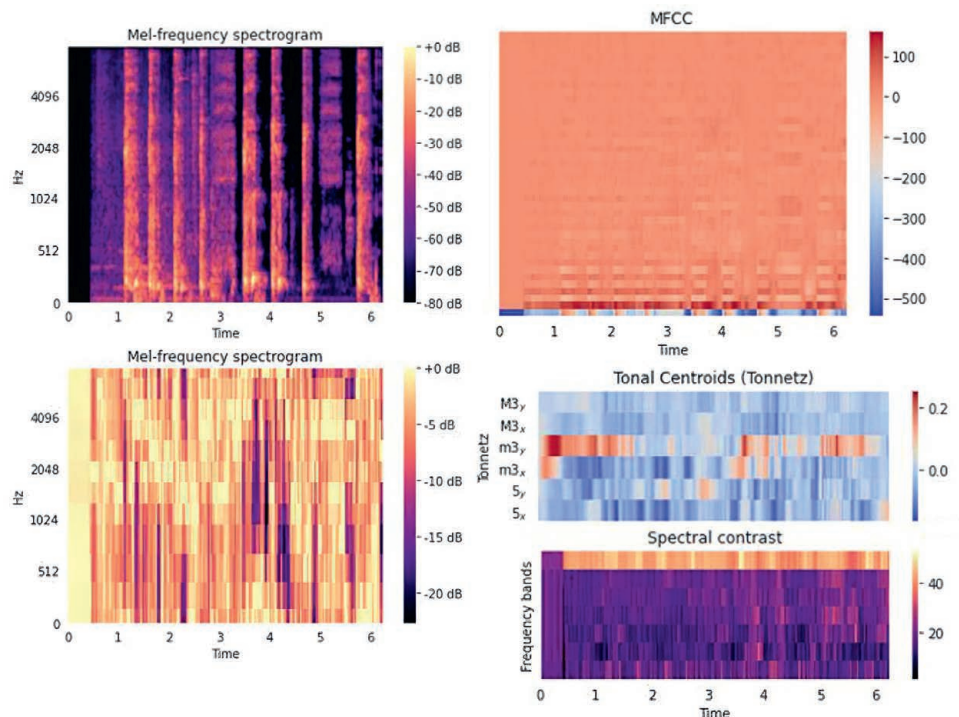


Fig. 3. 2D images representing audio features

The results obtained from the training stage varied according to the number of epoch parameters that were manually altered till the results showed no improvement. As the number of epochs was 300, it is obvious that the performance results will not be as expected and the average accuracy at this number was 43.2 %. The accuracy increased with the increase of epoch number that reached 53.06 % at 500 and 62.9 % at 700. At 1200 the results showed a good accuracy that recorded 77.95 % which also increased to reach 85.37 % at 1500 epochs and remained steady. According to the obtained result the model was saved and used for tests.

Fig. 4 shows the confusion matrix obtained when testing the algorithm on 111 sound files that were not imported to training and not seen before in addition to some recorded cough voices from volunteers using a smartphone microphone. The results showed that 93 files were classified correctly as cough sounds, 10 of them were also detected as non-cough sounds as they actually are. One of the sound files was classified as cough, however it is not and the remaining were classified as non-cough sounds however they are cough sounds. Moreover, the system was able to show the percentage of detection for the tested audio (i. e. 70 % – cough, 20 % – sneezing, 10 % – clock-tick).

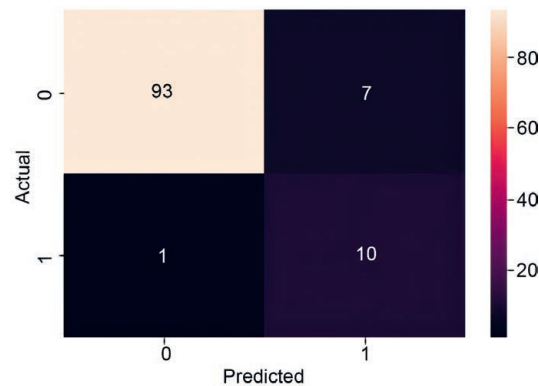


Fig. 4. Confusion matrix for cough detection system

Evaluating of machine learning model depends on some metrics known as precision and recall. Together, precision and recall should be used to know whether the system is good or not. Precision is the ratio of all true positives (classified as cough and they actually were cough) over the whole number of truly positives (both cough and non-cough). Whereas, recall or sensitivity is a ratio of all true positives over the number of true positives and false negatives (all data classified as cough). Using Sci-kit learn, both recall and precision were evaluated and showed 0.919 and 0.788 respectively, which definitely showed a very good classifier. This cough detection system can be used in the IoT network for sound environment monitoring, described in article [7].

## Conclusion

1. Cough is a critical symptom associated with many different respiratory diseases, and the detection of cough can lead to the prevention of serious infections and pandemics, such as COVID-19. A lot of research has been done in this area to identify cough sounds associated with certain diseases and to identify cough in general. The completed review introduces the current state of the most relevant cough detection systems and discusses the results obtained by them. The cough detection system designed by the authors was created using the publicly available environmental sound classification 50 (ESC-50) dataset, which was used for machine learning of a convolutional neural network. The network levels as well as the training methods were described in details.

2. After creating the model, another set of sounds was tested to evaluate the model. Several volunteers recorded their voices while coughing using their smartphones, it was guaranteed that they would record their voices in public places to make some noise in the sounds, in addition to some audio files that were uploaded online. The results showed an average accuracy of 85.37 %, precision of 78.8 % and a recall record of 91.9 %.

## References

1. Shakel N. V., Ablameyko M. S. (2020) *Medical Worker and Patient: Interaction in the Context of E-Health*. Minsk, Eco-Perspective Publ. (in Russian).
2. Alqudaihi K. S., Aslam N., Khan I. U. [et al.] (2021) Cough Sound Detection and Diagnosis Using Artificial Intelligence Techniques: Challenges and Opportunities. *IEEE Public Health Emergency Collection*. 9, 102327–102344.
3. Amoh J., Odame K. (2016) Deep Neural Networks for Identifying Cough Sounds. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*. 10 (5), 1003–1011.

4. Gong Y., Lai C.-I. J., Chung Y.-A., Glass J. (2021) SSAST: Self-Supervised Audio Spectrogram Transformer. *Applied Science*. 570–575.
5. Nanni L., Maguolo G., Brahnam S., Paci M. (2021) An Ensemble of Convolutional Neural Networks for Audio Classification. *Applied Science*. 57–76.
6. Chowdhury A., Ross A. (2019) Fusing MFCC and LPC Features using 1D Triplet CNN for Speaker Recognition in Severely Degraded Audio Signals. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*. 15, 1616–1629.
7. Visniakou U. A., Shaya B. H. (2022) Implementation of the Internet of Things Network for Monitoring Audio Information on a Microprocessor and Controller. *System Analysis and Application Informatics*. (1), 39–44.

### **Authors' contribution**

The authors contributed equally to the writing of the article.

### **Information about the authors**

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

**Shaya Bahaa H.**, Postgraduate at the Department of Infocommunication Technologies of the 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