

---

---

# ДОКЛАДЫ БГУИР

---

---

**Выходит шесть раз в год**

Научный журнал издается с января 2003 года

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

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

**Главный редактор**

**Вадим Анатольевич Богуш**

ректор Белорусского государственного университета  
информатики и радиоэлектроники

**Редакционная коллегия**

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

**Редакционный совет**

И. И. Абрамов, В. Е. Агабеков, И. С. Азаров, А. И. Белоус, Н. В. Гапоненко,  
С. В. Гапоненко, В. В. Голенков, В. Ф. Голиков, А. Л. Гурский, А. П. Достанко,  
В. А. Емельянов, А. А. Иванюк, Ф. Ф. Комаров, В. К. Конопелько, А. П. Кузнецов,  
А. А. Кураев, В. И. Курмашев, В. Л. Ланин, Н. И. Листопад, В. Е. Магюшков,  
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

<b>Пилипенко В. А., Ковальчук Н. С., Соловьёв Я. А., Шестовский Д. В., Жигулин Д. В.</b> Влияние быстрой термообработки при формировании контактов алюминий-поликремний на электрические параметры КМОП микросхем.....	5
<b>Корнилова Ю. Д., Чубенко Е. Б., Гапоненко Н. В.</b> Фототок структур кремний/титанат бария/никель .....	12
<b>Лопато У. П., Лапутько Д. Д., Гревцов Н. Л., Бондаренко В. П.</b> Особенности структуры пористого кремния, сформированного на сильнолегированных пластинах монокристаллического кремния электронного типа проводимости.....	17

<b>Кузьмар И. И., Гульпа Д. Ю., Кушнер Л. К.</b> Начальные стадии электрокристаллизации покрытий оловом и сплавами олово-медь и олово-медь-ультрадисперсный алмаз .....	26
<b>Дворников О. В., Чеховский В. А., Ловшенко И. Ю., Чонг Тхань Нгуен.</b> Схемотехническое моделирование воздействия тяжелых заряженных частиц на переходные процессы в биполярных аналоговых микросхемах .....	33
<b>Мордачев В. И., Свистунов А. С., Ционенко Д. А.</b> Прогнозирование уровня электромагнитного фона, создаваемого группировками спутников у земной поверхности, с использованием регистрационных данных .....	43
<b>Гейстер С. Р., Кириченко В. В.</b> Способ определения количества винтов в летательном аппарате по радиолокационному изображению, полученному путем обращенного синтеза апертуры антенны .....	53
<b>Каплярчук Е. А., Козлов С. В., Шапкин А. С.</b> Оценивание орбитальных параметров наноспутника при измерении полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции навигационных сигналов GPS.....	62
<b>Порхун М. И., Вашкевич М. И.</b> Метод повышения скорости выполнения алгоритма фазового преобразования .....	71
<b>Чернявский А. Ф., Козлова Е. И., Чернявский Ю. А.</b> Особенности структурно-аппаратного обеспечения преобразования информации в криптосистемах .....	80
<b>Рыбак В. А., Римарев И. М.</b> Аппаратно-программный комплекс управления энергетическими установками.....	89
<b>Касумов В. А., Алиева Ш. Х., Гарашлы Т. Дж., Асадова М. Я.</b> Современные технологии хранения данных в условиях Industry 4.0 .....	95
<b>Вишняков В. А., Юй Чу Юэ.</b> Разработка и моделирование сети интернета вещей для IT-диагностики пациентов.....	104

Ответственный секретарь Т. В. Мироненко

Подписано в печать 07.10.2024. Формат бумаги 60×84%. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 11,2. Тираж 75 экз. Заказ 171.

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

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

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

---

---

# DOKLADY BGUIR

---

---

**Published 6 times a year**

The journal is being published since January, 2003

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

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

**Editor-in-Chief**

**Vadim Bogush**

Rector of the Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics

## CONTENTS

<b>Pilipenko V. A., Kovalchuk N. S., Solovjov Ja. A., Shestovski D. V., Zhyhulin D. V.</b> The Influence of Rapid Heat Treatment During the Formation of Aluminum-Polysilicon Contacts on the Electrical Parameters of CMOS Microcircuits.....	5
<b>Karnilava Yu. D., Chubenko E. B., Gaponenko N. V.</b> Photocurrent in Silicon/Barium Titanate/Nikel Structures .....	12
<b>Lopato U. P., Laputko D. D., Grevtsov N. L., Bondarenko V. P.</b> Structural Features of Porous Silicon Formed on Heavily Doped Plates of Single-Crystal Silicon with Electron Conductivity.....	17
<b>Kuzmar I. I., Gulpa D. Y., Kushner L. K.</b> Initial Stages of Electrocrystallization of Coatings with Tin and Tin-Copper and Tin-Copper-Ultradisperse Diamond Alloys.....	26
<b>Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A., Lovshenko I. Yu., Trong Thanh Nguyen.</b> Circuit Modeling of the Impact of Heavy Charged Particles on Transient Processes in Bipolar Analog Microcircuits	33
<b>Mordachev V. I., Svistunou A. S., Tsyankenka D. A.</b> Prediction the Level of the Electromagnetic Background Created by Constellations of Satellites Near the Earth's Surface Using Registration Data .....	43
<b>Heister S. R., Kirychenka V. V.</b> Method for Determining the Number of Propellers in an Aircraft from a Radar Image Obtained by Inverse Synthesis of the Antenna Aperture .....	53

<b>Kaplarchuk E. A., Kozlov S. V., Shapkin A. S.</b> Estimating the Orbital Parameters of a Nanosatellite When Measuring the Total Electron Content in the Ionosphere Based on the Retransmission of GPS Navigation Signals .....	62
<b>Porhun M. I., Vashkevich M. I.</b> A Method for Speed Up the Allpass Transformation Algorithm ...	71
<b>Chernyavskiy A. F., Kozlova E. I., Chernyavskiy Yu. A.</b> Features of Structural Hardware Transformation of Information in Cryptosystems .....	80
<b>Rybak V. A., Rimarev I. M.</b> Hardware and Software Complex for Power Plant Management.....	89
<b>Gasimov V. A., Aliyeva Sh. Kh., Garashli T. J., Asadova M. Y.</b> Modern Data Storage Technologies in the Context of Industry 4.0 .....	95
<b>Vishniakou U. A., Yu Chu Yeu.</b> Development and Modeling of the Internet of Things Network for Patients IT Diagnostics.....	104

Responsible Secretary T. Mironenka

---

Signed for printing 07.10.2024. Format 60×84 1/8. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times.  
Ed.-pr. 1. 13,25. Ed.-ed. 1. 11,2. Edition 75 copies. Order 171.

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

---

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

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



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-5-11>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.383:539.1.43

## ВЛИЯНИЕ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОНТАКТОВ АЛЮМИНИЙ-ПОЛИКРЕМНИЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КМОП МИКРОСХЕМ

В. А. ПИЛИПЕНКО, Н. С. КОВАЛЬЧУК, Я. А. СОЛОВЬЁВ, Д. В. ШЕСТОВСКИЙ,  
Д. В. ЖИГУЛИН

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

Поступила в редакцию 08.02.2024

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

**Аннотация.** Рассмотрено влияние быстрой термической обработки (450 °С, 7 с) на электрические параметры КМОП интегральных микросхем при формировании омического контакта между алюминиевой металлизацией и поликремнием. В качестве анализируемых параметров *n*- и *p*-канальных транзисторов были выбраны следующие вольт-амперные характеристики зависимости тока стока от напряжения: на затворе при диодном включении; на стоке при различных напряжениях на затворе; на стоке в режиме пробоя канала без подачи потенциала на затвор. Сравнение этих параметров проводилось относительно микросхем, изготовленных с применением стандартной технологии (450 °С, 20 мин) для формирования данных контактов. Анализ результатов показал, что применение быстрой термической обработки для формирования омического контакта алюминий-поликремний позволяет значительно улучшить вышеуказанные характеристики *n*-МОП- и *p*-МОП-транзисторов. Из вольт-амперных характеристик *n*- и *p*-канальных транзисторов следует, что в области напряжений на затворе более 0,65 В ток стока после длительной термообработки выше, чем после быстрой. Анализ вольт-амперной характеристики тока стока от напряжения на стоке показал, что ток стока при использовании длительной термообработки значительно выше, чем после быстрой термообработки. При этом для длительной термообработки имеют место уменьшение напряжения пробоя канала только для *n*-канальных транзисторов и увеличение тока стока в области более 5 В как для *n*-, так и для *p*-канальных транзисторов. Такие улучшения протекают за счет исключения образования конгломератов поликремния в алюминиевом контакте, значительного уменьшения эпитаксиальной рекристаллизации кремния, легированного алюминием, на поверхности кремния, а также снижения микрорельефа границы раздела данного контакта и уменьшения роста размера контактных окон за счет бокового взаимодействия алюминия с поликремнием.

**Ключевые слова:** быстрая термическая обработка, омические контакты, температурная нагрузка, вольт-амперная характеристика.

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

**Для цитирования.** Влияние быстрой термообработки при формировании контактов алюминий-поликремний на электрические параметры КМОП микросхем / В. А. Пилипенко [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-5-11>.

## THE INFLUENCE OF RAPID HEAT TREATMENT DURING THE FORMATION OF ALUMINUM-POLYSILICON CONTACTS ON THE ELECTRICAL PARAMETERS OF CMOS MICROCIRCUITS

VLADIMIR A. PILIPENKO, NATALLIA S. KOVALCHUK, JAROSLAV A. SOLOVJOV,  
DMITRY V. SHESTOVSKI, DMITRY V. ZHYHULIN

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

*Submitted 08.02.2024*

**Abstract.** The influence of rapid heat treatment (450 °C, 7 s) on the electrical parameters of CMOS integrated circuits during the formation of ohmic contact between aluminum metallization and polysilicon is considered. The following volt-ampere characteristics of the dependence of drain current on voltage were chosen as the analyzed parameters of *n*- and *p*-channel transistors: at the gate when diode-connected; on the drain at different gate voltages; on the drain in the channel breakdown mode without applying potential to the gate. A comparison of these parameters was carried out with respect to microcircuits manufactured using standard technology (450 °C, 20 min) to form these contacts. Analysis of the results showed that the use of rapid heat treatment to form an ohmic aluminum-polysilicon contact can significantly improve the above characteristics of *n*-MOS and *p*-MOS transistors. From the current-voltage characteristics of *n*- and *p*-channel transistors it follows that in the region of gate voltages greater than 0.65 V, the drain current after long-term heat treatment is higher than after quick heat treatment. Analysis of the current-voltage characteristics of the drain current versus the drain voltage showed that the drain current when using long-term heat treatment is significantly higher than after rapid heat treatment. In this case, for long-term heat treatment, there is a decrease in the channel breakdown voltage only for *n*-channel transistors and an increase in the drain current in the region of more than 5 V for both *n*- and *p*-channel transistors. Such improvements occur by eliminating the formation of polysilicon conglomerates in the aluminum contact, significantly reducing the epitaxial recrystallization of silicon doped with aluminum on the silicon surface, as well as reducing the microrelief of the interface of this contact and reducing the growth in the size of contact windows due to the lateral interaction of aluminum with polysilicon.

**Keywords:** rapid heat treatment, ohmic contacts, temperature load, current-voltage characteristics.

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

**For citation.** Pilipenko V. A., Kovalchuk N. S., Solovjov Ja. A., Shestovski D. V., Zhyhulin D. V. (2024) The Influence of Rapid Heat Treatment During the Formation of Aluminum-Polysilicon Contacts on the Electrical Parameters of CMOS Microcircuits. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-5-11> (in Russian).

### Введение

Одним из важнейших условий создания надежных изделий микроэлектроники и увеличения степени их интеграции является снижение тепловой нагрузки, испытываемой кремнием при формировании на его поверхности интегральных микросхем (ИМС) [1]. Наиболее остро данный вопрос стоит при формировании омических контактов к поликремнию (ПКК) с применением длительной термической обработки (450 °C, 20 мин). Это обусловлено тем, что при таких температурах и времени обработки идет интенсивное взаимодействие ПКК с алюминием, приводящее к образованию конгломератов поликремния в алюминии, вызывающих увеличение его сопротивления, а, следовательно, изменения вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов. Как показано в [2, 3], это обусловлено тем, что при длительной термообработке происходит насыщение межзеренного пространства пленки алюминия кремнием, вызывая увеличение его сопротивления. Кроме того, в местах контакта ПКК с затвором МОП-транзисторов, резисторов и конденсаторов происходит осаждение ПКК в виде отдельных остроугольных островков, приводящих не только к ухудшению параметров микросхемы, но и к полному ее выходу из строя за счет короткого замыкания как между различными уровнями разводки, так и в разводке одного уровня.

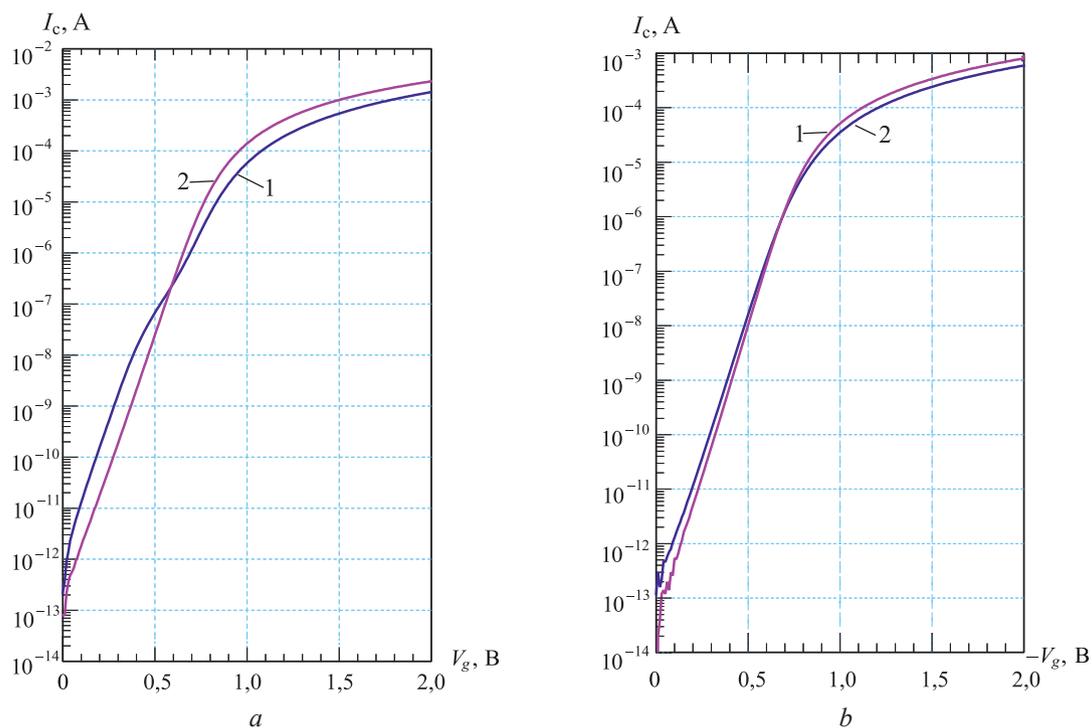
Одним из методов, снижающих протекание диффузионных процессов в различных микроэлектронных системах при высокотемпературных обработках, является применение быстрых термических обработок при создании ИМС [4–11]. Однако, если по механизму взаимодействия алюминий-кремний и алюминий-алюминий при различных видах термообработок и по их влиянию на электрические параметры ИМС имеются исчерпывающие данные в литературе, то отно-

сительно контактов алюминий-ПКК они практически отсутствуют. Исследования в этой области позволят установить основные причины их изменения при стандартном формировании таких контактов и определить пути их уменьшения.

### Методика проведения эксперимента

Для исследования влияния применения быстрой термообработки при формировании омических контактов алюминий-ПКК на электрические параметры ИМС была выбрана микросхема, выполненная по КМОП-технологии, т. е. имеющая как  $n$ -канальные, так и  $p$ -канальные транзисторы. Половина пластин из партии проходила быструю термообработку для формирования данного контакта при температуре  $450\text{ }^\circ\text{C}$  в течение  $7\text{ с}$  в атмосфере  $\text{N}_2$ , вторая половина пластин обрабатывалась по стандартному процессу при  $450\text{ }^\circ\text{C}$  в течение  $20\text{ мин}$  в аналогичной среде. Быстрая термообработка осуществлялась на установке УБТО ПИТ1801 путем облучения пластин с их нерабочей стороны импульсным фотонным потоком излучения галогенных ламп в режиме теплового баланса.

Исследуемыми параметрами ИМС являлись такие электрические характеристики  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов, как зависимость тока стока от напряжения: на затворе при диодном включении, на стоке при различных напряжениях на затворе, на стоке в режиме пробоя канала без подачи потенциала на затвор. Данные параметры определялись на комплексе прецизионных измерений вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик Keysight B1500A Semiconductor Device Analyzer с зондовой станцией MPI TS2000-SE (США). Анализ хода подпороговых характеристик  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов со сформированными контактами алюминий-поликремний и алюминий-кремний при длительной и быстрой термообработках показан на рис. 1.



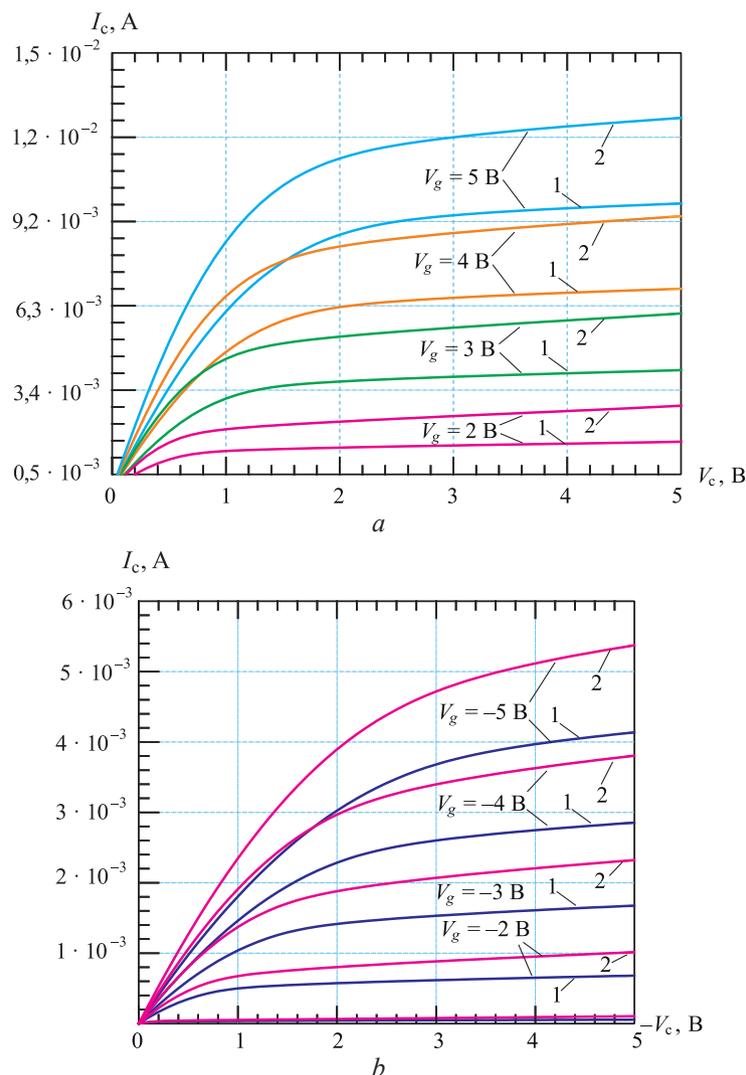
**Рис. 1.** Вольт-амперная характеристика зависимости тока стока  $I_c$  от напряжения на затворе  $V_g$  для  $n$ -МОП (а) и  $p$ -МОП (б) транзисторов при быстрой (1) и длительной (2) термообработках

**Fig. 1.** Current-voltage characteristic of the drain current  $I_c$  on the gate voltage  $V_g$  for  $n$ -MOS (a) and  $p$ -MOS (b) transistors using rapid (1) and long-term (2) heat treatments

В области малых напряжений на затворе ток стока после длительной термообработки меньше, чем после быстрой. В то же время при напряжении на затворе более  $0,65\text{ В}$  ток стока становится ниже, чем при использовании быстрой термообработки. Данный результат связан с различными процессами при формировании омических контактов к затвору и истоку при длительной и быстрой термообработках. Так, в первом случае контакт алюминия с поликремнием имеет развитый микрорельеф, приводящий к увеличению его площади, а омический контакт к истоку уменьшает-

ся за счет выделения эпитаксиально рекристаллизованного кремния, легированного алюминием на поверхности стокового контакта. Такой характер изменения площади контактов вызывает рост напряжения на затворе и уменьшение на стоке, приводя к более низкому току стока при напряжениях менее 0,65 В, по сравнению с контактами, полученными при быстрой термообработке, поскольку их площадь практически не изменяется. При дальнейшем росте напряжения на затворе эффект уменьшения площади истока, а, следовательно, и более низкого напряжения на нем, компенсируется значительным уменьшением сопротивления канала и быстрым ростом тока стока, который становится больше его величины на приборах, изготовленных с применением быстрой термообработки.

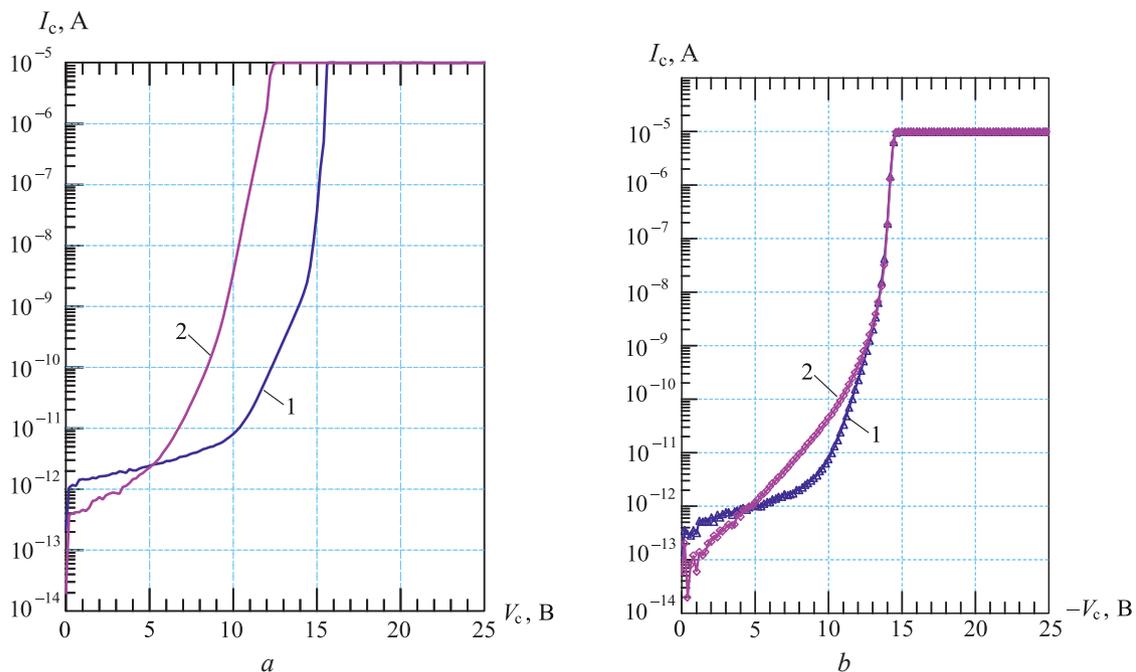
Из рис. 2 видно, что величина тока стока  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов при использовании длительной термообработки для формирования контакта алюминий-поликремний значительно больше, чем при быстрой термообработке. Данный факт обусловлен тем, что при длительной термообработке микрорельеф контакта алюминий-поликремний более развит, чем при быстрой, что приводит к большей его площади в первом случае. Поскольку контакт к затвору лежит вне транзистора, увеличение площади контакта ведет к увеличению тока к затвору, а, следовательно, и к росту напряжения на нем. Это будет приводить к уменьшению сопротивления канала и к более высокому току стока, чем в случае формирования контакта алюминий-поликремний с применением быстрой термообработки.



**Рис. 2.** Вольт-амперная характеристика зависимости тока стока  $I_c$  от напряжения на стоке  $V_c$  для  $n$ -МОП (а) и  $p$ -МОП (б) транзисторов при различных напряжениях на затворе  $V_g$  с применением быстрой (1) и длительной (2) термообработок

**Fig. 2.** Current-voltage characteristic of the drain current  $I_c$  on the drain voltage  $V_c$  for  $n$ -MOS (a) and  $p$ -MOS (b) transistors at different gate voltages  $V_g$  using rapid (1) and long-term (2) heat treatments

Исследование зависимости тока стока  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов от подаваемого на сток напряжения позволило установить следующие закономерности (рис. 3). При использовании для формирования омических контактов к стоку и затвору длительной термической обработки для  $n$ -канального транзистора после подачи на сток напряжения более 5 В ток стока становится значительно выше при более низких напряжениях стока, чем на приборах, изготовленных с применением быстрой термообработки. Это объясняется тем, что при таком напряжении происходит лавинный пробой локальных  $p$ - $n$ -переходов в области  $n^+$ -истока, сформированных на его поверхности за счет выделения островков эпитаксиально рекристаллизованного кремния, легированного алюминием, т. е. имеющих  $p$ -тип проводимости. Возникновение лавинного пробоя в области стока вызывает увеличение площади омического контакта и дальнейшее его развитие с увеличением напряжения на стоке вплоть до пробоя стока при напряжении 12 В. В случае быстрой термообработки такие островки кремния на поверхности стока практически отсутствуют, что и обуславливает их лучшие характеристики. Так, напряжение пробоя стока для них составляет 15,5 В.



**Рис. 3.** Вольт-амперная характеристика зависимости тока стока  $I_c$  от напряжения на стоке  $V_c$  для  $n$ -МОП (а) и  $p$ -МОП (б) транзисторов при быстрой (1) и длительной (2) термообработках  
**Fig. 3.** Current-voltage characteristic of the drain current  $I_c$  on the drain voltage  $V_c$  for  $n$ -MOS (а) and  $p$ -MOS (б) transistors, using rapid (1) and long-term (2) heat treatments

Для  $p$ -канального транзистора, изготовленного с применением длительной термообработки, наблюдается увеличение тока стока в области от 5 до 12 В. Это обуславливается наличием островков кремния  $p$ -типа проводимости, сформированных в результате эпитаксиальной рекристаллизации кремния из пленки алюминия на поверхности  $p^+$ -стокового контакта, что приводит к увеличению его контактного сопротивления и, как следствие, – к незначительному росту стокового напряжения и росту тока стока. Существенным отличием  $p$ -канального транзистора от  $n$ -канального, изготовленного с применением длительной и быстрой термообработок, является отсутствие на нем уменьшения напряжения пробоя стока. Данный результат связан с различной природой роста контактного сопротивления для  $n^+$ - и  $p^+$ -стоковых контактов, который в первом случае связан с формированием локальных областей с  $p$ - $n$ -переходами на стоковом контакте, а во втором – с локальными областями с более низкой концентрацией носителей  $p$ -типа. Поскольку контактное сопротивление в первом случае будет гораздо больше, чем во втором, то и падение напряжения на стоковом контакте в первом случае будет гораздо больше, чем во втором, что не привело к снижению пробоя стока для  $p$ -канального транзистора.

## Заключение

1. Применение быстрой термической обработки (450 °С, 7 с) для формирования омических контактов алюминий-поликремний в отличие от стандартной технологии (450 °С, 20 мин) позволяет значительно улучшить электрические характеристики *n*-МОП и *p*-МОП транзисторов. Подпороговые характеристики *n*- и *p*-канальных транзисторов показали, что в области напряжений на затворе более 0,65 В ток стока после длительной термообработки выше, чем после быстрой.

2. Анализ вольт-амперных характеристик зависимости тока стока от напряжения на стоке показал, что ток стока при длительной термообработке значительно выше, чем при быстрой. При этом для длительной термообработки имеют место уменьшение напряжения пробоя канала для *n*-канальных транзисторов и увеличение тока стока в области более 5 В для *p*-канальных. Такие улучшения связаны с отсутствием конгломератов поликремния в алюминии, со значительным уменьшением эпитаксиальной рекристаллизации кремния, легированного алюминием, а также со снижением микрорельефа границы раздела контакта и с уменьшением роста размера контактных окон за счет бокового взаимодействия алюминия с поликремнием.

## Список литературы

1. Пилипенко, В. А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В. А. Пилипенко. Минск: Изд. центр Бел. гос. ун-та, 2004.
2. Влияние термической нагрузки при формировании контактов Al-Al на электрические параметры интегральных микросхем с контактами Al-поликремний / В. А. Пилипенко [и др.] // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 7. С. 20–27.
3. Влияние длительной и быстрой термообработок на формирование границы раздела алюминий-поликремний / В. А. Пилипенко [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2023. № 2. С. 51–57.
4. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС / О. А. Агеев [и др.]. Харьков: Науч.-технол. комплекс «Институт монокристаллов» НАН Украины, 2008.
5. Афонин, Н. Н. Модель взаимодиффузии при формировании тонких пленок металлов на монокристаллическом кремнии в условиях ограниченной растворимости компонентов / Н. Н. Афонин, В. А. Логачева // Конденсированные среды и межфазные границы. 2022. Т. 24, № 1. С. 129–135.
6. Пилипенко, В. А. Взаимодействия кремния с алюминием при фотонной обработке / В. А. Пилипенко, В. В. Рожков, В. А. Горушко // Электронная техника. 1990. Сер. 2, вып. 3. С. 24–28.
7. Пилипенко, В. А. Управление свойствами тонкопленочных систем с применением импульсной фотонной обработки / В. А. Пилипенко, В. Н. Пономарь, В. А. Горушко // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76, № 4. С. 95–98.
8. Влияние временных режимов термообработки на микроструктуру системы Pt-Si / В. А. Солодуха [и др.] // Доклады БГУИР. 2020. Т. 18, № 2. С. 105–111.
9. Формирование подзатворного диэлектрика нанометровой толщины методом быстрой термообработки / Н. С. Ковальчук [и др.] // Доклады БГУИР. 2021. Т. 19, № 4. С. 103–112.
10. Шугуров, А. Р. Механизмы возникновения напряжений в тонких пленках и покрытиях / А. Р. Шугуров, А. В. Панин // Журнал технической физики. 2020. Т. 90, вып. 12. С. 1971–1994.
11. Sachenko, A. V. Current Flow Through Metal Shunts in Ohmic Contacts to  $n^+$ -Si // A. E. Belyaev, V. A. Pilipenko // J. Semiconductors. 2014. Vol. 48, No 4. P. 492–496.

## References

1. Pilipenko V. A. *Rapid Thermal Processing in VLSI Technology*. Minsk, Publishing Center of Belarusian State University (in Russian).
2. Pilipenko V. A., Soloduha V. A., Kovalchuk N. S., Solovjov Ja. A., Shestovski D. V., Zhyhulin D. V. (2022) Thermal Load Influence During the Formation of Al-Al contacts on the Electrical Parameters of the Integrated Circuits with Al-Polysilicon Contacts. *Doklady BGUIR*. 20 (7), 20–27 (in Russian).
3. Pilipenko V. A., Kovalchuk N. S., Shestovski D. V., Zhyhulin D. V., Anischik V. M., Ponariadov V. V. (2023) The Influence of Long-Term and Rapid Heat Treatments on the Formation of the Aluminum-Polysilicon Interface. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. (2), 51–57 (in Russian).
4. Ageev O. A., Belyaev A. E., Boltovets N. S., Konakova R. V., Milenin V. V., Pilipenko V. A. (2008) *Phases of Implantation in Semiconductor Devices and VLSI Technology*. Kharkov, Scientific and Technological Complex “Institute of Single Crystals” of the National Academy of Sciences of Ukraine (in Russian).
5. Afonin N. N., Logachova V. A. (2022) Model of the Formation of Thin Films of Metals on Single-Crystalline Silicon Under Conditions of Limited Solubility of Components. *Condensed Matter and Interphase Boundaries*. 24 (1), 129–135 (in Russian).

6. Pilipenko V. A., Rozhkov V. V., Gorushko V. A. (1990) Interactions of Silicon with Aluminum During Photonic Processing. *Electronic Equipment*. 2 (3), 24–28 (in Russian).
7. Pilipenko V. A., Ponomar V. N., Gorushko V. A. (2003) Controlling the Properties of Thin Film Systems Using Pulsed Photonic Processing. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 76 (4), 95–98 (in Russian).
8. Soloduha V. A., Pilipenko V. A., Komarov F. F., Gorushko V. A. (2020) Influence of Time Modes of Thermal Treatment on Pt-Si System Microstructure. *Doklady BGUIR*. 18 (2), 105–111 (in Russian).
9. Kovalchuk N. S., Omelchenko A. A., Pilipenko V. A., Soloduha V. A., Shestovski D. V. (2021) Formation of a Gate Dielectric of Nanometer Thickness Using Rapid Heat Treatment. *Doklady BGUIR*. 19 (4), 103–112 (in Russian).
10. Shugurov A. R., Panin A. V. (2020) Mechanisms of Stressgeneration in Thin Films and Coatings. *Journal of Technical Physics*. 90 (12), 1971–1994 (in Russian).
11. Sachenko A. V., Pilipenko V. A. (2014) Current Flow Through Metal Shunts in Ohmic Contacts to  $n^+$ -Si. *J. Semiconductors*. 48 (4), 492–496.

### Вклад авторов

Пилипенко В. А., Ковальчук Н. С., Соловьёв Я. А., Шестовский Д. В. осуществили постановку задачи для проведения исследования, участвовали в обсуждении результатов.

Пилипенко В. А., Жигулин Д. В. провели изготовление образцов и их измерения, подготовили аналитический обзор по тематике, выполнили анализ и систематизацию полученных результатов, подготовили рукопись статьи.

### Authors' contribution

Pilipenko V. A., Kovalchuk N. S., Solovjov Ja. A., Shestovski D. V. carried out the formulation of the task for the research, participated in the discussion of the results.

Pilipenko V. A., Zhyhulin D. V. conducted the preparation of samples and their measurements, prepared an analytical review on the subject, analyzed and systematized the results, prepared the manuscript of the article.

### Сведения об авторах

**Пилипенко В. А.**, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. НАН Беларуси, зам. дир. по научному развитию Государственного центра «Белмикрoанализ», ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ОАО «ИНТЕГРАЛ»)

**Ковальчук Н. С.**, канд. техн. наук, доц., первый зам. глав. инж., ОАО «ИНТЕГРАЛ»

**Соловьёв Я. А.**, канд. техн. наук, доц., зам. дир. филиала «Транзистор», ОАО «ИНТЕГРАЛ»

**Шестовский Д. В.**, инж.-техн. отдела перспективных технологических процессов, ОАО «ИНТЕГРАЛ»

**Жигулин Д. В.**, нач. сектора физико-технического анализа Государственного центра «Белмикрoанализ», ОАО «ИНТЕГРАЛ»

### Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Казинца, 121а  
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
Тел.: +375 29 684-43-35  
E-mail: zhygulin@mail.ru  
Жигулин Дмитрий Владимирович

### Information about the authors

**Pilipenko V. A.**, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Corresponding Member of the NAS of Belarus, Deputy Director for Scientific Development of the “Belmicroanalysis” State Center, JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (JSC “INTEGRAL”)

**Kovalchuk N. S.**, Cand. of Sci., Associate Professor, First Deputy Chief Engineer, JSC “INTEGRAL”

**Solovjov Ja. A.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Deputy Director of “Transistor” Branch, JSC “INTEGRAL”

**Shestovski D. V.**, Engineer-Technologist at the Advanced Technological Processes Department, JSC “INTEGRAL”

**Zhyhulin D. V.**, Head of the Sector of Physical and Technical Analysis of the “Belmicroanalysis” State Center, JSC “INTEGRAL”

### Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,  
Minsk, Kazintsa St., 121a  
JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL”  
Tel.: +375 29 684-43-35  
E-mail: zhygulin@mail.ru  
Zhyhulin Dmitry Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-12-16>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.315.592:621.382

## ФОТОТОК СТРУКТУР КРЕМНИЙ/ТИТАНАТ БАРИЯ/НИКЕЛЬ

Ю. Д. КОРНИЛОВА, Е. Б. ЧУБЕНКО, Н. В. ГАПОНЕНКО

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

*Поступила в редакцию 05.03.2024*

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

**Аннотация.** С использованием золь-гель-метода синтезированы фоточувствительные структуры кремний/титанат бария/никель с нелегированным титанатом бария и легированным европием. Изучены вольт-амперные характеристики в условиях освещения ксеноновой лампой с выделением монохроматической линии в диапазоне 400–800 нм и в темновом режиме. Синтезированные структуры показали наличие фототока на обратной ветви вольт-амперных характеристик во всем исследованном диапазоне длин волн освещения. Максимальный ток обратной ветви для структуры с нелегированным титанатом бария был достигнут при воздействии излучения с длиной волны 470 нм и составил около 0,6 мкА для диапазона напряжения смещения от 2 до 10 В. Легирование титаната бария европием приводит к увеличению фототока на 17–26 %.

**Ключевые слова:** титанат бария, вольт-амперные характеристики, фототок, золь-гель-синтез, европий.

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

**Для цитирования.** Корнилова, Ю. Д. Фототок структур кремний/титанат бария/никель / Ю. Д. Корнилова, Е. Б. Чубенко, Н. В. Гапоненко // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 12–16. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-12-16>.

## PHOTOCURRENT IN SILICON/BARIUM TITANATE/NICKEL STRUCTURES

YULIANA D. KARNILAVA, EUGENE B. CHUBENKO, NIKOLAI V. GAPONENKO

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

*Submitted 05.03.2024*

**Abstract.** Photosensitive silicon/barium titanate/nickel structures with undoped barium titanate and doped europium were synthesized using the sol-gel method. The current-voltage characteristics were studied under illumination with a xenon lamp, highlighting a monochromatic line in the range of 400–800 nm and in dark mode. The synthesized structures showed the presence of a photocurrent on the reverse branch of the current-voltage characteristics over the entire studied range of illumination wavelengths. The maximum reverse branch current for a structure with undoped barium titanate was achieved when exposed to radiation with a wavelength of 470 nm and was about 0.6  $\mu$ A for a bias voltage ranging from 2 to 10 V. Doping barium titanate with europium leads to an increase in the photocurrent by 17–26 %.

**Keywords:** barium titanate, current-voltage characteristics, photocurrent, sol-gel synthesis, europium.

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

**For citation.** Karnilava Yu. D., Chubenko E. B., Gaponenko N. V. (2024) Photocurrent in Silicon/Barium Titanate/Nikel Structures. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 12–16. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-12-16> (in Russian).

## Введение

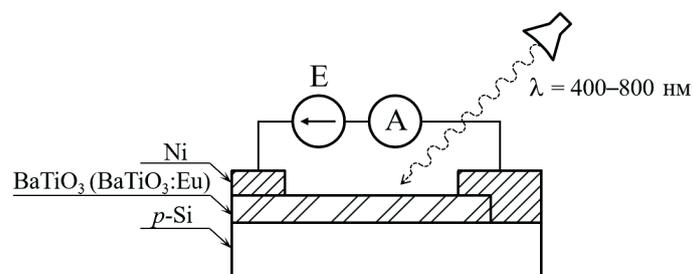
Еще в XX веке были проведены исследования основных физико-химических свойств неорганических перовскитов, включая титанат бария, титанат стронция и твердые растворы на их основе [1, 2]. Однако именно в последние годы, наряду с высокой диэлектрической проницаемостью [3], наличием высокоомных и низкоомных состояний [4, 5], спонтанной поляризацией и электрооптическими эффектами [6, 7], исследователей привлекает явление фототока, наблюдаемого в структурах с пленками неорганических перовскитов [8, 9]. Титанат бария, полученный золь-гель-методом, показывает хорошую воспроизводимость свойств и стабильные оптические характеристики [10, 11]. Использование золь-гель-метода дает возможность формировать пленки титаната бария на кремниевых подложках при невысокой температуре для получения гетероструктур и обеспечивать интеграцию фоточувствительных устройств из этого неорганического перовскита с кремниевой схмотехникой на одной подложке.

В статье представлены результаты проведенных исследований вольт-амперных характеристик (ВАХ) и фоточувствительности гетероструктур  $p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3/\text{Ni}$  и  $p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3:\text{Eu}/\text{Ni}$ , полученных на основе сформированных золь-гель-методом тонких пленок беспримесного и легированного европием титаната бария.

## Методика проведения эксперимента

Пленки титаната бария были получены золь-гель-методом с использованием золя на основе тетраизопророксида титана и ацетата бария, которые последовательно растворялись в смеси уксусной кислоты и ацетилаcetона. Исходная концентрация реактивов выбиралась таким образом, чтобы обеспечить массовую концентрацию  $\text{BaTiO}_3$  в золе 60 мг/мл. Полученные золи методом центрифугирования со скоростью 2700 об./мин наносились на подложки из монокристаллического кремния марки КДБ-20 ( $p\text{-Si}$ ). После нанесения каждого слоя проводились сушка в течение 10 мин при 200 °С на воздухе и последующий отжиг в течение 60 мин при 450 °С также в воздушной атмосфере. Таким способом были изготовлены структуры с трехслойными пленками титаната бария. Пленки титаната бария, легированного европием, получали по вышеописанному методу с добавлением в золь титаната бария ацетата европия для получения концентрации европия в легированном перовските 3 ат. %.

Далее на поверхность пленок титаната бария путем напыления через контактную маску наносились контактные площадки из никеля в форме квадрата со стороной 0,8 мм, а также электрод большей площади, обеспечивающий омический контакт к подложке монокристаллического кремния. Схематическое изображение структуры и схема регистрации ВАХ представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Схематическое изображение поперечного сечения гетероструктуры  $p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3$  с нанесенными контактами и схемой измерения вольт-амперных характеристик  
**Fig. 1.** Schematic representation of the cross section of a  $p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3$  heterostructure with applied contacts and a circuit for measuring the current-voltage characteristics

ВАХ структур регистрировались при комнатной температуре в интервале напряжений  $U = \pm 10$  В при помощи источника-измерителя Keithley 2450. Для измерений использовалась пара электрод меньшей площади/электрод большей площади. Проводились исследования темновых ВАХ при отсутствии освещения, а также при воздействии монохроматического излучения. Для освещения образца использовалась ксеноновая лампа мощностью 1 кВт, из спектра излучения которой двойным монохроматором Solar ТП DM160 выделяли монохроматические линии в диапазоне длин волн 400–800 нм с шагом 50 нм. Структуры освещались со стороны пленки титаната бария.

## Результаты исследований и их обсуждение

Сформированные трехслойные пленки легированного и нелегированного титаната бария являются аморфными, толщина пленок – около 175–180 нм [12]. На рис. 2 представлены результаты измерения ВАХ полученных структур при отсутствии освещения и при воздействии излучения. ВАХ структур соответствуют характеристике выпрямляющей структуры. Освещение поверхности образцов монохроматическим излучением с длиной волны в диапазоне от 400 до 800 нм практически не влияет на прямую ветвь ВАХ. Величина тока, протекающего через структуру при обратном смещении при отсутствии освещения, не превышает 1 нА. В темновом режиме в диапазоне приложенного смещения от 0 до (–10) В малый ток обратной ветви свидетельствует о наличии достаточно высоких энергетических барьеров в гетеропереходе  $p$ -Si/BaTiO<sub>3</sub>, препятствующих движению носителей заряда.

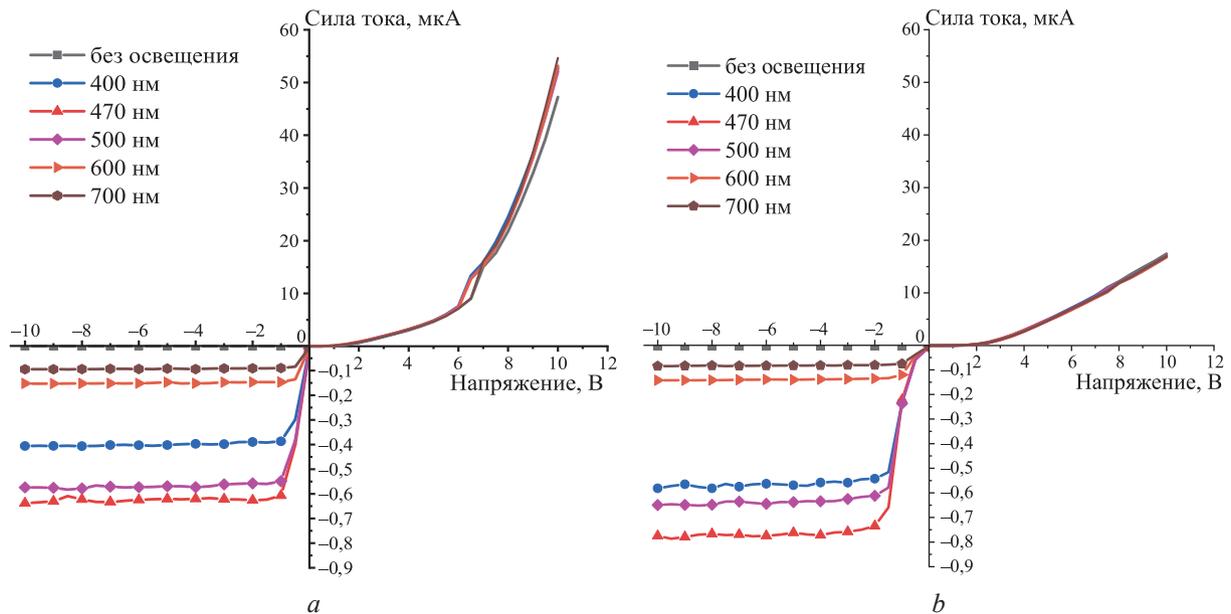


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики полученных структур при воздействии излучения с различной длиной волны:  $a$  –  $p$ -Si/BaTiO<sub>3</sub>/Ni;  $b$  –  $p$ -Si/BaTiO<sub>3</sub>:Eu/Ni

Fig. 2. Current-voltage characteristics of obtained structures under radiation with different wavelengths:  $a$  –  $p$ -Si/BaTiO<sub>3</sub>/Ni;  $b$  –  $p$ -Si/BaTiO<sub>3</sub>:Eu/Ni

Установлено, что легирование европием титаната бария приводит к уменьшению фототока на прямой ветви ВАХ. Для структуры с пленкой нелегированного титаната бария ( $p$ -Si/BaTiO<sub>3</sub>/Ni) при напряжении 10 В в условиях воздействия монохроматическим излучением 800 нм значение тока на прямой ветви ВАХ составляет ~55 мкА. Это значение в три раза превышает величину тока, протекающего через структуру с пленкой легированного европием титаната бария ( $p$ -Si/BaTiO<sub>3</sub>:Eu/Ni). Согласно расчету, статическое сопротивление структур с нелегированным и легированным титанатом бария при прямом смещении при напряжении 10 В составляет 182 и 573 кОм соответственно.

В полученных структурах с пленками титаната бария при воздействии излучения наблюдается изменение тока на обратной ветви ВАХ, величина которого зависит от длины волны излучения. Для исследуемых образцов при освещении фототок обратной ветви выходит на насыщение при напряжениях менее 2 В. Для образца с пленкой нелегированного BaTiO<sub>3</sub> наблюдается увеличение максимального значения фототока на обратной ветви ВАХ от 0,03 до 0,64 мкА при освещении в диапазоне от 400 до 800 нм (рис. 2,  $a$ ), для образца с легированной пленкой BaTiO<sub>3</sub>:Eu – увеличение фототока от 0,01 до 0,77 мкА (рис. 2,  $b$ ).

Полученные результаты показывают, что легирование европием приводит к увеличению фототока на обратной ветви ВАХ. Максимальное абсолютное значение фототока обратной ветви наблюдалось при напряжении 10 В в условиях освещения монохроматическим излучением 470 нм. Для структуры  $p$ -Si/BaTiO<sub>3</sub>:Eu/Ni при обратном смещении от 2 до 10 В значение фототока было больше на 17–26 %, чем для структуры  $p$ -Si/BaTiO<sub>3</sub>/Ni. Максимальный ток обратной ветви дости-

гался при воздействии излучения с длиной волны 470 нм, что соответствует максимуму интенсивности использованного источника излучения. Полученные данные ВАХ являются усредненными для выборки из трех контактов для каждого образца.

### Заключение

1. Получены структуры  $p$ -Si/BaTiO<sub>3</sub>/Ni и  $p$ -Si/BaTiO<sub>3</sub>:Eu/Ni, содержащие тонкие пленки титаната бария, синтезированные золь-гель-методом.

2. Установлено, что формирование трехслойных покрытий из титаната бария золь-гель-методом на  $p$ -Si приводит к появлению фототока на обратной ветви вольт-амперных характеристик выпрямляющего перехода кремний/титанат бария, величина которого при напряжении 10 В составляет 0,64–0,77 мкА при освещении монохроматическим излучением с длиной волны 470 нм от ксеноновой лампы.

3. Представленные структуры могут найти применение в разработке сенсорных устройств систем освещения.

### Список литературы

1. Ржанов, А. В. Титанат бария – новый сегнетоэлектрик / А. В. Ржанов // Успехи физических наук. 1949. Т. 38, вып. 4. С. 461–489.
2. Hoffmann, S. Dielectric Properties, Leakage Behaviour, and Resistance Degradation of Thin Films of the Solid Solution Series Ba(Ti<sub>1-y</sub>Zr<sub>y</sub>)O<sub>3</sub> / S. Hoffmann, R. M. Waser // Integrated Ferroelectrics. 1997. Vol. 17, No 1. P. 141–152. <https://doi.org/10.1080/10584589708012989>.
3. High Dielectric Constant of SrTiO<sub>3</sub> Thin Films Prepared by Chemical Process / F. M. Pontes [et al.] // Journal of Materials Science. 2000. Vol. 35. P. 4783–4787. <https://doi.org/10.1023/A:1004816611050>.
4. Resistance Switching and Retention Behaviors in Polycrystalline La-doped SrTiO<sub>3</sub> Ceramics Chip Devices / S. Hirose [et al.] // Journal of Applied Physics. 2008. Vol. 104, No 5. <https://doi.org/10.1063/1.2975316>.
5. Resistance Switching Behavior of Atomic Layer Deposited SrTiO<sub>3</sub> Film Through Possible Formation of Sr<sub>2</sub>Ti<sub>6</sub>O<sub>13</sub> or Sr<sub>1</sub>Ti<sub>11</sub>O<sub>20</sub> Phases / W. Lee [et al.] // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. <https://doi.org/10.1038/srep20550>.
6. Tarun, M. C. Persistent Photoconductivity in Strontium Titanate / M. C. Tarun, F. A. Selim, M. D. McCluskey // Physical Review Letters. 2013. Vol. 111. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.187403>.
7. Ferroelectric BaTiO<sub>3</sub> Thin-Film Optical Waveguide Modulators / A. Petraru [et al.] // Applied Physics Letters. 2002. Vol. 81. P. 1375–1377. <https://doi.org/10.1063/1.149815>.
8. Electrooptic Modulation up to 40 GHz in a Barium Titanate Thin Film Waveguide Modulator / P. Tang [et al.] // Optics Express. 2004. Vol. 12. P. 5962–5967. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.005962>.
9. Upconversion Luminescence from Sol-Gel-Derived Erbium- and Ytterbium-Doped BaTiO<sub>3</sub> Film Structures and the Target Form / N. V. Gaponenko [et al.] // Photonics. 2023. Vol. 10, No 4. <https://doi.org/10.3390/photonics10040359>.
10. Фототок в структурах кремний/титанат стронция/никель / П. А. Холов [и др.] // Доклады БГУИР. 2018. № 1. С. 19–24.
11. Anaraki, H. S. Photocurrent in Strontium Titanate Films on Silicon Substrates / H. S. Anaraki, N. V. Gaponenko, V. A. Ivanov // Journal of Applied Spectroscopy 2015. Vol. 82. P. 857–860. <https://doi.org/10.1007/s10812-015-0194-9>.
12. Оптические свойства многослойных пленочных структур BaTiO<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>, сформированных золь-гель-методом / Н. В. Гапоненко [и др.] // Физика твердого тела. 2019. Т. 63, № 3. С. 528–532. DOI: 10.21883/FTT.2019.03.47246.197.

### References

1. Rzhzanov A. V. (1949) Barium Titanate – a New Ferroelectric. *Advances in Physical Sciences*. 38 (4), 461–489 (in Russian).
2. Hoffmann S., Waser R. M. (1997) Dielectric Properties, Leakage Behaviour, and Resistance Degradation of Thin Films of the Solid Solution Series Ba(Ti<sub>1-y</sub>Zr<sub>y</sub>)O<sub>3</sub>. *Integrated Ferroelectrics*. 17 (1), 141–152. <https://doi.org/10.1080/10584589708012989>.
3. Pontes F. M., Lee E. J. H., Leite E. R., Longo E., Varela J. A. (2000) High Dielectric Constant of SrTiO<sub>3</sub> Thin Films Prepared by Chemical Process. *Journal of Materials Science*. 35, 4783–4787. <https://doi.org/10.1023/A:1004816611050>.
4. Hirose S., Nakayama A., Niimi H., Kageyama K., Takagi H. (2008) Resistance Switching and Retention Behaviors in Polycrystalline La-doped SrTiO<sub>3</sub> Ceramics Chip Devices. *Journal of Applied Physics*. 104 (5). <https://doi.org/10.1063/1.2975316>.

5. Lee W., Yoo S., Yoon K. J., Yeu I. W., Chang H. J., Choi J.-H., et al. (2016) Resistance Switching Behavior of Atomic Layer Deposited SrTiO<sub>3</sub> Film Through Possible Formation of Sr<sub>2</sub>Ti<sub>6</sub>O<sub>13</sub> or Sr<sub>1</sub>Ti<sub>11</sub>O<sub>20</sub> Phases. *Scientific Reports*. 6. <https://doi.org/10.1038/srep20550>.
6. Tarun M. C., Selim F. A., McCluskey M. D. (2013) Persistent Photoconductivity in Strontium Titanate. *Physical Review Letters*. 111. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.187403>.
7. Petraru A., Schubert J., Schmid M., Buchal Ch. (2002) Ferroelectric BaTiO<sub>3</sub> Thin-Film Optical Waveguide Modulators. *Applied Physics Letters*. 81, 1375–1377. <https://doi.org/10.1063/1.1498151>.
8. Tang P., Towner D. J., Hamano T., Meier A. L., Wessels B. W. (2004) Electrooptic Modulation up to 40 GHz in a Barium Titanate Thin Film Waveguide Modulator. *Optics Express*. 12, 5962–5967. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.005962>.
9. Gaponenko N. V., Staskov N. I., Sudnik L. V., Vityaz P. A., Luchanok A. R., Karnilava Y. D., et al. (2023) Upconversion Luminescence from Sol-Gel-Derived Erbium- and Ytterbium-doped BaTiO<sub>3</sub> Film Structures and the Target Form. *Photonics*. 10 (4). <https://doi.org/10.3390/photonics10040359>.
10. Kholov P. A., Gaponenko N. V., Golosov D. A., Zavadski S. M., Kolosnitsin B. S., Ivanov V. A., et al. (2018) Photocurrent in Silicon/Strontium Titanate/Nickel Structures. *Doklady BSUIR*. (1), 19–24 (in Russian).
11. Anaraki H. S., Gaponenko N. V., Ivanov V. A. (2015) Photocurrent in Strontium Titanate Films on Silicon Substrates. *Journal of Applied Spectroscopy*. 82, 857–860. <https://doi.org/10.1007/s10812-015-0194-9>.
12. Gaponenko N. V., Kholov P. A., Sukalin K. S., Raichenok T. F., Tikhomirov S. A., Subasri R., et al. (2019) Optical Properties of Multilayer BaTiO<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> Film Structures Formed by the Sol-Gel Method. *Physics of the Solid State*. 61, 397–401. <https://doi.org/10.1134/S1063783419030120> (in Russian).

### Вклад авторов

Корнилова Ю. Д. нанесла пленки неорганических перовскитов на кремниевые подложки, выполнила построение графиков, подготовила рукопись статьи.

Чубенко Е. Б. провел измерение вольт-амперных характеристик структур, принял участие в написании статьи.

Гапоненко Н. В. осуществил постановку задачи исследования, принял участие в интерпретации их результатов и написании статьи.

### Authors' contribution

Karnilava Yu. D. deposited films of inorganic perovskites on silicon, completed the construction of graphs, prepared the manuscript of the article.

Chubenko E. B. measured the current-voltage characteristics of the structures, took part in writing the article.

Gaponenko N. V. carried out the formulation of the research problem, took part in the interpretation of the results and writing the article.

### Сведения об авторах

**Корнилова Ю. Д.**, асп., мл. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Нанопотоника» (НИЛ 4.5), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

**Чубенко Е. Б.**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Материалы и структуры нанопотоники», БГУИР

**Гапоненко Н. В.**, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. НИЛ 4.5, БГУИР

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-88-75  
E-mail: nik@nano.bsuir.edu.by  
Гапоненко Николай Васильевич

### Information about the authors

**Karnilava Yu. D.**, Postgraduate, Junior Researcher at the Scientific Research Laboratory “Nanophotonics” (Lab. 4.5), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

**Chubenko E. B.**, Cand. of Sci., Leading Researcher at the Scientific Research Laboratory “Materials and Structures of Nanoelectronics”, BSUIR

**Gaponenko N. V.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Head of the Lab. 4.5, BSUIR

#### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-88-75  
E-mail: nik@nano.bsuir.edu.by  
Gaponenko Nikolai Vasil'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-17-25>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 544.653

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, СФОРМИРОВАННОГО НА СИЛЬНОЛЕГИРОВАННЫХ ПЛАСТИНАХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ТИПА ПРОВОДИМОСТИ

У. П. ЛОПАТО, Д. Д. ЛАПУТЬКО, Н. Л. ГРЕВЦОВ, В. П. БОНДАРЕНКО

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

*Поступила в редакцию 14.02.2024*

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

**Аннотация.** С помощью сканирующей электронной микроскопии изучены структуры поверхности и внутренних областей пористого кремния, полученного анодированием сильнолегированных пластин монокристаллического кремния электронного типа проводимости в растворе фтористоводородной кислоты при различных плотностях тока. Установлено, что на поверхности пористого кремния имеются поры темно-серого и светло-серого цветов, отличающиеся размерами и плотностью расположения. Поры темно-серого цвета имеют большие размеры, а их плотность примерно в 5–10 раз меньше, чем плотность светло-серых пор. Показано, что поры светло-серого цвета представляют собой неразвившиеся поры небольшой глубины, а темно-серые являются входными отверстиями глубоких пор бутылкообразной формы, проходящих от поверхности вглубь монокристалла. Эквивалентные диаметры светло-серых пор на поверхности пористого кремния составляют 12–15 нм и практически не зависят от плотности анодного тока. При этом эквивалентные диаметры темно-серых пор и средние расстояния между их центрами увеличиваются по линейному закону от 15 до 35 нм на поверхности и от 35 до 120 нм для внутренних областей пористого кремния при увеличении плотности тока от 30 до 90 мА/см<sup>2</sup>. Средняя толщина элементов кремниевого скелета на поверхности составляет около 3 нм и увеличивается до 5–6 нм во внутренних областях пористого кремния. Задавая плотность анодного тока, можно получать слои пористого кремния с различными структурными параметрами. Результаты исследований имеют практическую значимость для формирования композитных материалов на основе пористого кремния, который используется как пористая матрица для осаждения металлов и полупроводников.

**Ключевые слова:** сканирующая электронная микроскопия, анализ изображений, электрохимическое анодирование, плотность анодного тока, пористый кремний, плотность пор, эквивалентный диаметр.

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

**Благодарность.** Авторы выражают благодарность Д. В. Жигулину за проведение измерений с использованием сканирующей электронной микроскопии. Исследования выполнены в рамках решения задач проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Т23М-040 и грантов Министерства образования Республики Беларусь для магистрантов.

**Для цитирования.** Особенности структуры пористого кремния, сформированного на сильнолегированных пластинах монокристаллического кремния электронного типа проводимости / У. П. Лопато [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 17–25. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-17-25>.

## STRUCTURAL FEATURES OF POROUS SILICON FORMED ON HEAVILY DOPED PLATES OF SINGLE-CRYSTAL SILICON WITH ELECTRON CONDUCTIVITY

ULYANA P. LOPATO, DIANA D. LAPUTKO, NIKITA L. GREVTSOV,  
VITALY P. BONDARENKO

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

*Submitted 14.02.2024*

**Abstract.** Using scanning electron microscopy, the structures of the surface and internal regions of porous silicon obtained by anodizing heavily doped plates of single-crystal silicon with electron conductivity in a hydrofluoric acid solution at different current densities were studied. It is found that the porous silicon surface has dark gray and light gray pores, which differ in size and surface distribution density. Dark gray pores possess larger sizes, and their density is about 5–10 times less than that of light gray pores. Based on the cross-section imagery, it is shown that light gray pores correspond to underdeveloped channels of small depth, while dark gray pores are the entrance points of deep bottle-shaped channels passing from the surface into the depth of the silicon wafer. The equivalent diameters of light gray pores on the surface of porous silicon are 12–15 nm and are practically independent of the anodic current density. At the same time, the equivalent diameters of dark gray pores and average distances between their centers increase linearly from 15 to 35 nm on the surface and from 35 to 120 nm in the volume of porous silicon when the current density is increased from 30 to 90 mA/cm<sup>2</sup>. The average thickness of silicon skeleton elements is about 3 nm on the surface and increases to 5–6 nm in the volume. By setting the density of the anode current, it is possible to obtain layers of porous silicon with different structural parameters. The obtained research results have practical significance for the formation of composite materials based on porous silicon, which can be used as a porous matrix for the deposition of metals and semiconductors.

**Keywords:** scanning electron microscopy, image analysis, electrochemical anodizing, anodic current density, porous silicon, pore density, equivalent diameter.

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

**Gratitude.** The authors are grateful to D. V. Zhigulin for conducting scanning electron microscopy measurements. The research was conducted as part of task No T23M-040 for the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, as well as Master's Student grants provided by the Ministry of Education of the Republic of Belarus.

**For citation.** Lopato U. P., Laputko D. D., Grevtsov N. L., Bondarenko V. P. (2024) Structural Features of Porous Silicon Formed on Heavily Doped Plates of Single-Crystal Silicon with Electron Conductivity. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 17–25. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-17-25> (in Russian).

### Введение

Пористый кремний (ПК) открыт в 1956 г. при проведении экспериментов по электрохимической полировке монокристаллического кремния [1]. Изначально ПК считался побочным продуктом, мешающим получению блестящей поверхности полируемого монокристалла кремния. Интерес к данному материалу появился в начале 70-х годов прошлого века, когда было предложено использовать ПК для формирования областей диэлектрической изоляции интегральных схем [2]. С этой целью ПК подвергался высокотемпературному окислению, что приводило к образованию окисленного ПК с электрофизическими свойствами, подобными двуокиси кремния. Для данной цели знать структурные параметры пористых слоев не требовалось, в связи с чем исследования структуры ПК практически не выполнялись.

В начале 80-х годов прошлого века стали активно проводиться работы по использованию ПК как буферного слоя для осаждения эпитаксиальных слоев кремния [3, 4]. Этот подход разрабатывался для изготовления структур кремния на изоляторе и был доведен до индустриального производства фирмой Canon (Япония) [5]. Учеными Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР) совместно со специалистами Римского университета La Sapienza были проведены исследования, в которых определены такие структурные параметры ПК, как плотность и размеры пор на поверхности в зависимости от режимов формирования,

что было необходимо для получения эпитаксиальных слоев кремния на пористой поверхности [6]. Впоследствии ПК успешно использовался как буферный слой для формирования на кремниевых пластинах гетероэпитаксиальных слоев GaAs, PbS, InSb и GaN [7]. Для применения ПК как буферного слоя, на поверхности которого формируются эпитаксиальные слои, требовались данные только о структурных параметрах поверхностных областей ПК, в связи с чем глубоких исследований структуры объема ПК не производилось.

Ситуация коренным образом изменилась в начале 1990-х годов после опубликования работы L. T. Canham [8], где впервые предлагалось рассматривать ПК как материал, в котором элементы скелета кремния, разделяющие поры, являются наноразмерными кристаллитами и проявляют квантовые размерные эффекты, приводящие в том числе к интенсивной видимой люминесценции света. Данная статья привела к лавинообразному увеличению количества публикаций, посвященных исследованию процессов формирования ПК и изучению его свойств. Для подтверждения наблюдаемых размерных эффектов было произведено большое количество исследований внутренней структуры ПК и получены данные о влиянии размеров элементов кремниевого скелета на его люминесцентные свойства. К сожалению, несмотря на большой объем выполненных исследований, соответствующие данные относились в основном к характеристике размеров элементов кремниевого скелета и практически не затрагивали вопросов корректного определения параметров внутренних областей (объема) ПК [9].

В современных исследованиях ПК часто рассматривается в качестве матрицы для создания композитных материалов путем заполнения каналов пор различными металлами и полупроводниками [10]. Этот подход позволяет формировать в кремниевых пластинах области композитных материалов со свойствами, не присущими исходной подложке. Так, учеными БГУИР и Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники» (МИЭТ) разработана методика заполнения каналов пор ПК германием [11, 12]. Термообработка композитов такого рода позволяет формировать пленки сплава кремний-германий, известного как эффективный высокотемпературный термоэлектрический материал. Преобразователи на основе сплавов кремний-германий применяются, в частности, на космических аппаратах для длительных миссий [13].

Для успешного синтеза композитных материалов на основе ПК необходимы воспроизводимые и надежные данные о структуре как поверхностных, так и внутренних областей пористого слоя. Структура поверхностных областей непосредственно определяет саму возможность введения материалов в объем пор, а структура объема – итоговую форму и количественное соотношение компонентов после заполнения каналов материалом-«гостем». Настоящая статья направлена на устранение имеющегося пробела в характеристике структурных параметров ПК и посвящена комплексному исследованию как внутренних, так и поверхностных областей пористого слоя в зависимости от режимов его формирования.

### Методика проведения эксперимента

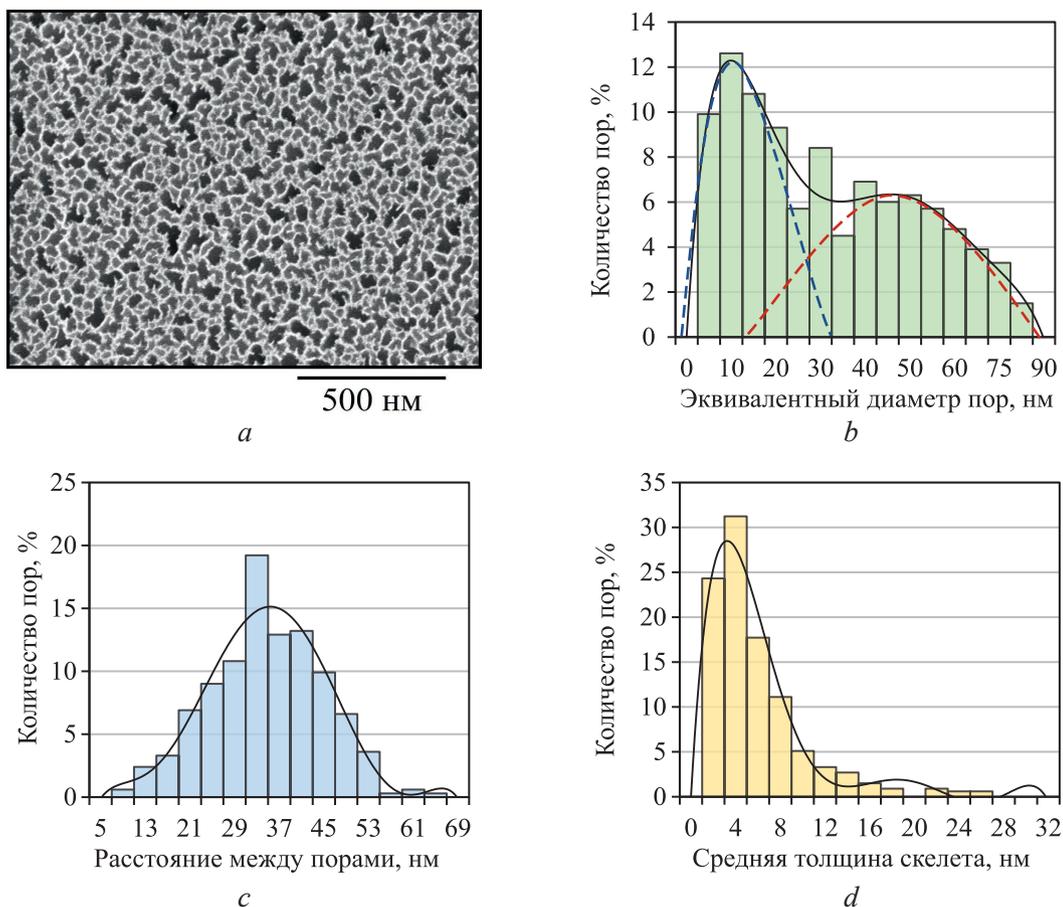
В качестве подложек использовались сильнолегированные кремниевые пластины КЭС 0,01 (100), позволяющие получать однородные слои ПК с широким спектром пористости путем анодирования при различных плотностях тока (от 30 до 90 мА/см<sup>2</sup>). Анодирование производилось в фторопластовой электрохимической ячейке с платиновым контрэлектродом с использованием электролита, содержащего фтористоводородную кислоту (45 %), три части деионизированной воды и одну часть изопропилового спирта. Время обработки варьировалось для достижения схожей толщины слоев ПК (2,5–3,0 мкм) при всех используемых значениях плотности тока. Для анализа структуры внутренних областей верхняя часть слоя ПК удалялась химически путем коррозионного осаждения меди с ее последующим травлением в 20%-ном растворе HNO<sub>3</sub>.

Структура образцов изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi S-4800. Полученные СЭМ-изображения были проанализированы с использованием программного комплекса ImageJ, позволяющего установить основные геометрические параметры объектов, различимых на изображениях поверхности. Толщина боковых стенок пор (ширина скелета) оценивалась с использованием расширения для ImageJ, созданного авторами [14], в составе которого расстояние  $d$  между границами двух соседних пор с координатами  $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$  опре-

деляется как  $d = 2 \cdot ((y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2)^{1/2} - (D_1/2 + D_2/2)$ , где  $D_1, D_2$  – эквивалентные диаметры двух пор, вычисленные из их площадей в предположении, что они имеют круглую форму. Учитывая приближение по форме поры, этот метод дает точные результаты для круглых пор, однако в достаточной мере применим и к структурам, рассматриваемым в данной статье. На основании полученных значений подготовлены гистограммы распределения пор по размерам, среднему расстоянию до центров соседних пор и средней ширине скелета.

### Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1, *a* представлено СЭМ-изображение поверхности слоя ПК, полученного при плотности тока  $90 \text{ mA/cm}^2$  в течение 45 с. Входные отверстия каналов пор имеют неправильную форму, отличающуюся от круглой, и многие из них соединены друг с другом. В программном комплексе ImageJ была проведена оценка цвета пор по шкале градации серого. Часть пор имеет темно-серый цвет, оставшиеся – светло-серый. При этом поры темно-серого цвета обладают наибольшими размерами. Элементы кремниевого скелета между порами имеют белый или светло-серый цвет. В результате анализа снимка поверхности установлены значения плотности расположения всех пор (число пор на единицу площади), плотности темно-серых и светло-серых пор в отдельности, а также построены гистограммы распределения пор по эквивалентным диаметрам (рис. 1, *b*), среднему расстоянию между центрами пор (рис. 1, *c*) и средней толщине элементов кремниевого скелета (рис. 1, *d*). На изображениях количество пор указано в процентах от общего количества пор на анализируемом снимке.



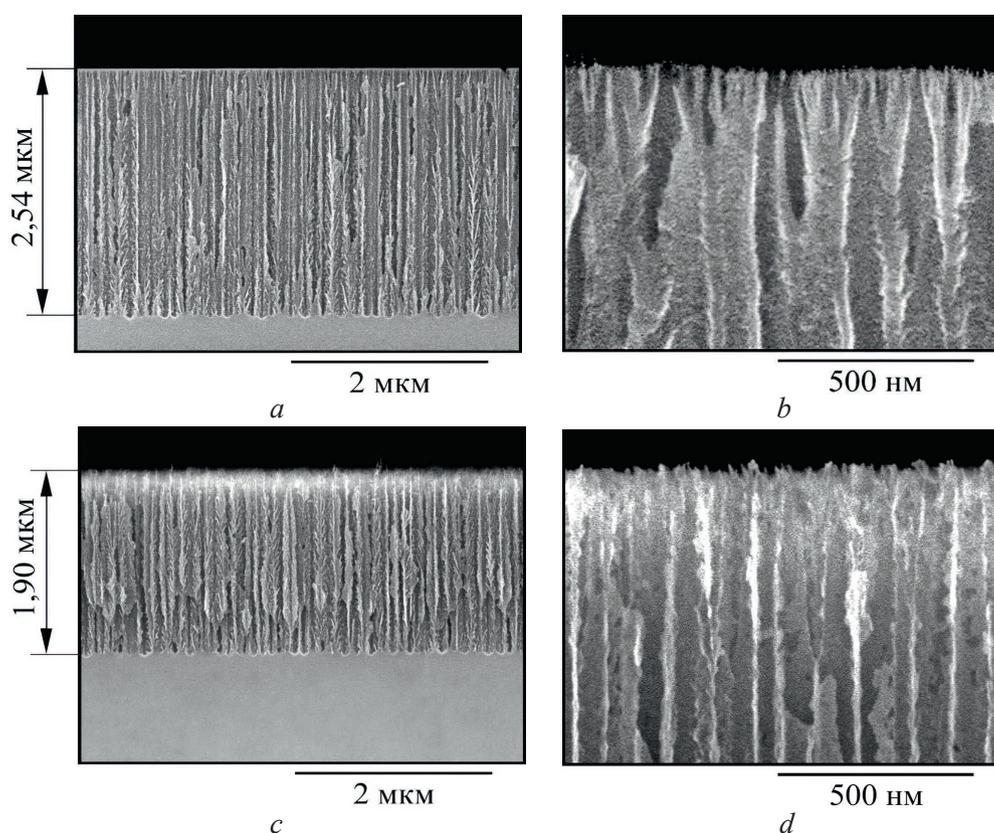
**Рис. 1.** СЭМ-изображение поверхности образца пористого кремния, полученного анодированием при плотности тока  $90 \text{ mA/cm}^2$  в течение 45 с (*a*), и гистограммы распределения:

*b* – эквивалентных диаметров пор; *c* – средних значений расстояния до центров соседних пор; *d* – толщины кремниевого скелета

**Fig. 1.** SEM image of the surface of a porous silicon sample obtained by anodizing at a current density of  $90 \text{ mA/cm}^2$  for 45 s (*a*) and distribution histograms: *b* – equivalent pore diameters; *c* – average values of the distance to the centers of neighboring pores; *d* – thickness of the silicon skeleton

Плотность всех пор на СЭМ-изображении составила  $7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , темно-серых –  $8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ , светло-серых –  $6,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ . Как видно из рис. 1, *b*, гистограмма распределения пор по эквивалентным диаметрам состоит из двух распределений. Графическое разделение гистограммы (пунктирные линии) позволяет определить положения максимумов этих распределений, находящихся на 12 и 48 нм. Правое плечо первого распределения уширено в сторону больших диаметров пор, а второе распределение представляется симметричным. Разумно полагать, что первое распределение характеризует поры светло-серого цвета, а второе – темно-серого. Распределение пор по расстоянию между их центрами (рис. 1, *c*) имеет симметричный вид с максимумом на 35 нм. Распределение по толщине элементов кремниевого скелета несимметрично и уширено в сторону больших значений. Средняя толщина элементов скелета (рис. 1, *d*) составляет 5–6 нм, при этом имеются элементы скелета толщиной 10–16 и даже 18–26 нм.

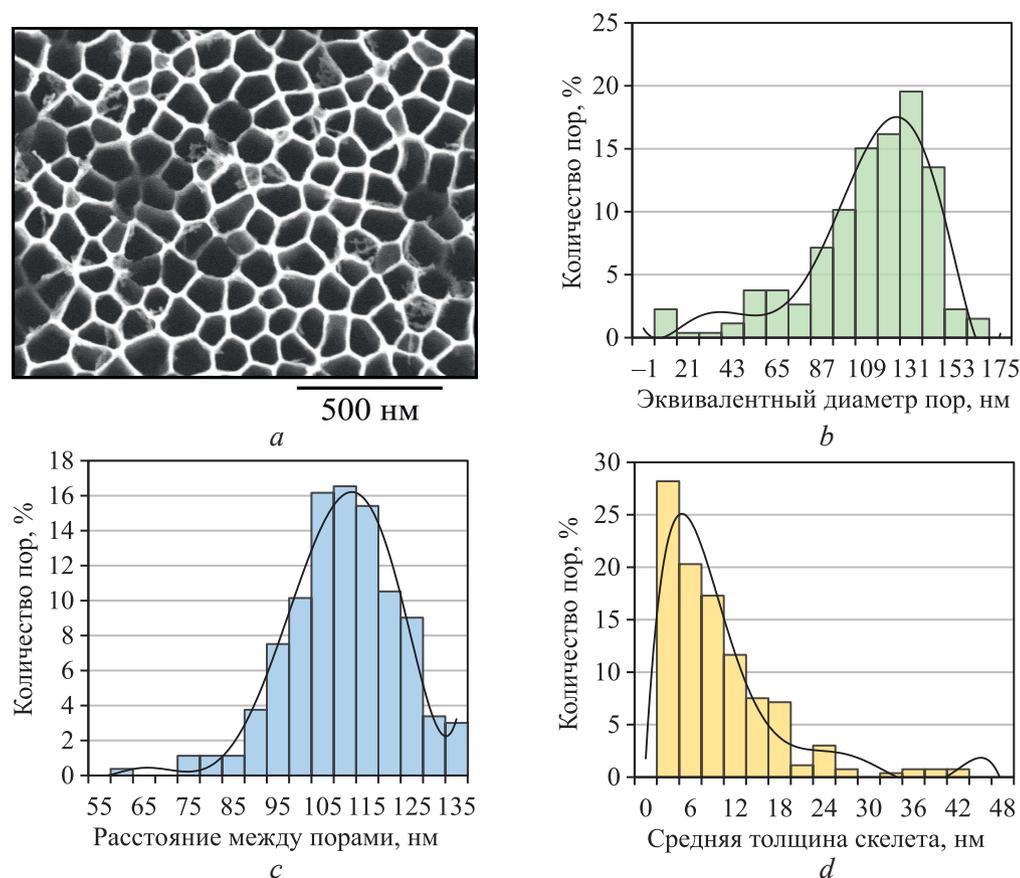
Для определения формы каналов пор проанализированы СЭМ-изображения сколов представленного ранее образца – полученные снимки с различным увеличением приведены на рис. 2. Как видно из рис. 2, *a, b*, исходный слой ПК имеет толщину 2,54 мкм. Каналы пор направлены перпендикулярно поверхности и имеют шероховатые стенки. В приповерхностной области есть «неразвившиеся» поры длиной 0,3–0,5 мкм, которые на снимке поверхности (рис. 1, *a*) имеют светло-серый цвет. На сколе хорошо наблюдаются поры, проходящие от поверхности на всю глубину пористого слоя – они соответствуют темно-серым порам на изображении поверхности. На основании данных снимков можно заключить, что темно-серые поры имеют бутылкообразную форму. Длина приповерхностных «горлышек» с меньшим по сравнению с основным объемом диаметром составляет 0,1–0,3 мкм.



**Рис. 2.** СЭМ-изображения скола образца пористого кремния, полученного анодированием при плотности тока  $90 \text{ мА/см}^2$  в течение 45 с до (*a, b*) и после (*c, d*) удаления поверхностного слоя  
**Fig. 2.** SEM images of a cleavage of a porous silicon sample obtained by anodizing at a current density of  $90 \text{ mA/cm}^2$  for 45 s before (*a, b*) and after (*c, d*) the removal of the surface layer

Корректно определить диаметры пор по изображению скола непросто из-за сложной формы пор и особенностей раскалывания образца. Скол образца монокристаллического кремния с ориентацией поверхности (100) получается практически «зеркальным», однако не все поры в пористом слое разделяются точно по центру, что затрудняет корректное определение их геометрических параметров. Для более точного изучения структуры внутренних областей верхнюю

часть слоя ПК удаляли методом коррозионного осаждения меди с последующим травлением. Данный метод заключается в иммерсии (погружении) исходного ПК в раствор для осаждения, где протекают окислительно-восстановительные реакции между кремниевым скелетом и ионами металла из раствора. В результате происходит процесс восстановления ионов металла, сопряженный с растворением скелета ПК, т. е. имеет место замещение атомов материала подложки атомами осаждаемого металла. Изображения скола образца ПК после такой обработки приведены на рис. 2, *c*, *d*, а изображение поверхности – на рис. 3. Толщина слоя ПК после травления уменьшилась до 1,90 мкм, что говорит об удалении верхнего поверхностного слоя толщиной 0,64 мкм. Поры на сколе имеют форму цилиндров с шероховатыми стенками.



**Рис. 3.** СЭМ-изображение поверхности образца пористого кремния, полученного анодированием при плотности тока 90 мА/см<sup>2</sup> в течение 45 с после удаления поверхностного слоя (*a*), и гистограммы распределения: *b* – эквивалентных диаметров пор;

*c* – средних расстояний до центров соседних пор; *d* – толщины кремниевого скелета

**Fig. 3.** SEM image of the surface of a porous silicon sample obtained by anodization at a current density of 90 mA/cm<sup>2</sup> for 45 s after the removal of the surface layer (*a*) and distribution histograms:

*b* – equivalent pore diameters; *c* – average distances to the centers of neighboring pores;

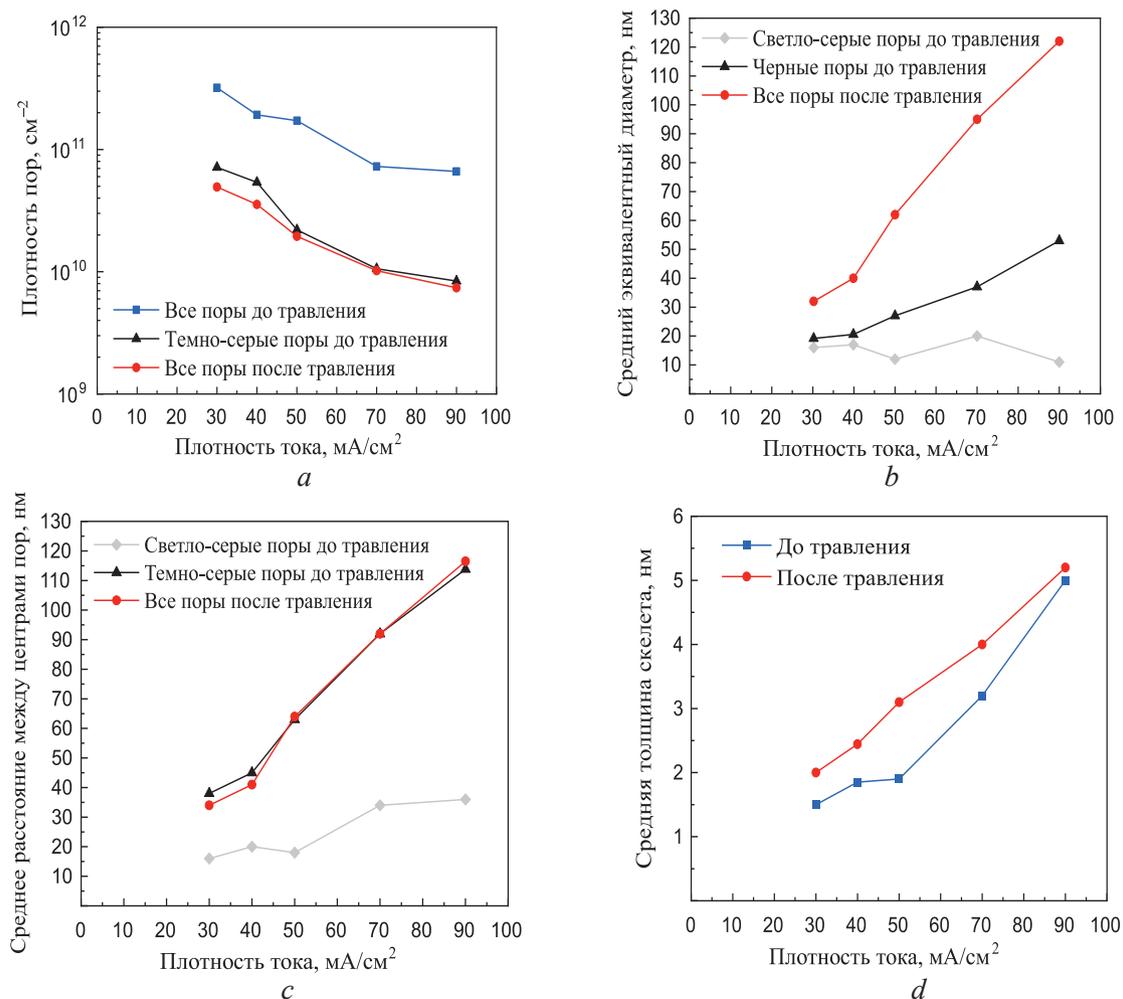
*d* – thickness of the silicon skeleton

Анализ изображения скола позволяет произвести оценку плотности пор по его длине, в рассматриваемом случае составляющей  $1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ . Таким образом, поверхностная плотность при данном методе расчета будет равна  $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , что в достаточной мере соответствует значению плотности темно-серых пор, полученному при анализе рис. 1.

Как видно из представленного на рис. 3, *a* изображения поверхности, поры в объеме слоя имеют более упорядоченный размер и выраженную многоугольную форму, с наибольшей вероятностью связанную с использованием подложки с ориентацией (100). При этом характерного для исходной поверхности разделения пор на светло-серые и темно-серые не наблюдается: все поры имеют одинаковый темно-серый цвет, а разделяющие их элементы кремниевого скелета – белый или светло-серый. По аналогии с представленными ранее результатами произведен анализ геометрических параметров пор, видимых на рис. 3. Плотность расположения пор составила  $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Распре-

деление пор по эквивалентным диаметрам имеет один выраженный максимум (рис. 3, *b*). Левое плечо уширено в сторону меньших диаметров, а среднее значение диаметра составляет 120 нм. Распределение средних значений расстояния между центрами каналов пор симметричное и имеет максимум при 110 нм (рис. 3, *c*). Распределение толщины элементов кремниевого скелета, напротив, несимметрично и уширено в сторону больших величин, при этом максимум приходится на 5–6 нм (рис. 3, *d*). Наблюдаются также элементы скелета толщиной 10–26 и даже 30–42 нм. Распределение толщины элементов скелета для образца после удаления верхнего слоя ПК хорошо совпадает с аналогичным распределением для элементов скелета исходного образца ПК (рис. 1, *d*).

По описанной выше методике изучены образцы ПК, полученные при плотностях анодного тока 30, 40, 50 и 70  $\text{mA}/\text{cm}^2$ . Результаты анализа структурных параметров образцов приведены в виде зависимостей плотности пор (рис. 4, *a*), средних эквивалентных диаметров (рис. 4, *b*), расстояний между центрами пор (рис. 4, *c*) и толщины элементов скелета (рис. 4, *d*) от плотности тока. Как видно из совокупности полученных данных, увеличение плотности тока приводит к уменьшению плотности пор на поверхности как для исходных образцов ПК до травления, так и для поверхности образцов с удаленным верхним слоем.



**Рис. 4.** Зависимости ряда структурных параметров слоев пористого кремния от плотности тока анодирования до и после удаления приповерхностного слоя (до и после травления):  
*a* – плотность расположения пор на поверхности; *b* – средний эквивалентный диаметр поры;  
*c* – среднее расстояние между центрами соседних пор;  
*d* – средняя толщина элементов кремниевого скелета между порами

**Fig. 4.** Dependences of a number of structural parameters of porous silicon layers on the anodizing current density before and after the removal of the surface layer (before and after etching):  
*a* – density of pores on the surface; *b* – average equivalent pore diameter; *c* – average distance between the centers of adjacent pores  
*d* – average thickness of the silicon skeleton elements between pores

Так, при увеличении плотности тока от 30 до 90 мА/см<sup>2</sup> наблюдается пятикратное уменьшение плотности всех пор (темно-серых и светло-серых) на поверхности исходного ПК. При этом плотность темно-серых пор по сравнению с плотностью светло-серых на образцах обоих типов при 90 мА/см<sup>2</sup> уменьшается в 8–10 раз, а при более низких плотностях тока – в 4 раза (рис. 4, *a*). Из рис. 4, *b* видно, что эквивалентный диаметр светло-серых пор на поверхности исходных образцов ПК составляет порядка 12–15 нм и практически не зависит от плотности тока. Диаметр же темно-серых пор увеличивается по линейному закону от 15 до 50 нм в исследованном диапазоне плотностей анодного тока. Диаметр пор на поверхности ПК после травления верхнего слоя также увеличивается по линейному закону в пределах от 30 до 120 нм.

Из рис. 4, *c* видно, что у исходных образцов ПК показатели среднего расстояния между центрами всех пор незначительно увеличиваются от 15 до 35 нм в исследованном диапазоне плотностей тока. Анализируя расстояния между темно-серыми порами на поверхности исходного ПК и порами в объеме пористого материала, можно заметить, что соответствующие зависимости практически идентичны, а значения расстояний в обоих случаях варьируются от 35 до 120 нм. Этот результат является дополнительным фактором, указывающим на то, что темно-серые поры на поверхности исходных образцов ПК соответствуют входным отверстиям глубоких каналов пор.

Как видно на рис. 4, *d*, толщина элементов скелета в исходных образцах ПК при малых плотностях анодного тока (30–50 мА/см<sup>2</sup>) составляет всего 1,5–2,0 нм и увеличивается до 5,0 нм при увеличении плотности тока до 90 мА/см<sup>2</sup>. Толщина элементов скелета образцов ПК после травления примерно на 0,5–1,0 нм больше, чем у исходных образцов ПК в диапазоне плотностей тока 30–70 мА/см<sup>2</sup>. При плотности тока 90 мА/см<sup>2</sup> толщины элементов скелета примерно одинаковы и составляют 5 нм для исходных образцов ПК и образцов с удаленным верхним слоем.

## Заключение

1. Структурные параметры слоев пористого кремния, полученного анодированием сильнолегированных пластин монокристаллического кремния электронного типа проводимости в растворе на основе фтористоводородной кислоты, определяются в первую очередь плотностью анодного тока. На основе анализа электронных изображений поверхности установлено, что на поверхности пористого кремния имеются поры темно-серого и светло-серого цветов, отличающиеся размерами и поверхностной плотностью. Поры темно-серого цвета имеют большие размеры, а их плотность в 5–10 раз меньше, чем плотность светло-серых пор.

2. Поры светло-серого цвета представляют собой неразвившиеся каналы небольшой глубины, а темно-серые поры на поверхности являются входными отверстиями длинных бутылкообразных пор, проходящих от поверхности вглубь монокристалла кремния. Установлено, что эквивалентные диаметры светло-серых пор на поверхности пористого кремния составляют 12–15 нм и практически не зависят от плотности анодного тока. Диаметры темно-серых пор и расстояния между их центрами определяются плотностью анодного тока и увеличиваются по линейному закону от 15 до 35 нм для поверхностных областей пористого кремния и от 35 до 120 нм для внутренних областей пористого кремния при увеличении плотности анодного тока от 30 до 90 мА/см<sup>2</sup>. Толщина элементов скелета пористого кремния при плотностях анодного тока 30–50 мА/см<sup>2</sup> составляет 1,5–2,0 нм и увеличивается до 5,0 нм при плотности тока анодирования 90 мА/см<sup>2</sup>. Во всем диапазоне использованных плотностей тока толщина элементов скелета во внутренних областях пористого кремния на 0,5–1,0 нм больше, чем у элементов скелета на поверхности пористого кремния. При плотности тока 90 мА/см<sup>2</sup> толщины элементов скелета во внутренних областях пористого кремния и на поверхности практически одинаковы и составляют 5 нм.

3. Полученные данные о структурных параметрах слоев пористого кремния и их зависимости от режимов анодирования имеют важное значение для формирования композитных материалов на основе пористого кремния при использовании последнего в качестве пористой матрицы для заполнения металлами и другими полупроводниками.

## Список литературы / References

1. Uhler A. (1956) Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon. *Bell Syst. Tech. J.* 35, 333–338. <http://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1956.tb02385.x>.

- Labunov V. A., Bondarenko V. P., Borisenko V. E. (1978) Porous Silicon in Semiconductor Electronics. *Foreign Electronics Technology*. (15) (in Russian).
- Konaka S., Tabe M., Sakai T. (1982) A New Silicon on Insulator Structure Using a Silicon Molecular Beam Epitaxial Growth on Porous Silicon. *Appl. Phys. Lett.* 41, 86–88. <https://doi.org/10.1063/1.93298>.
- Labunov V. A., Bondarenko V. P., Glinenko L. K., Basmanov I. N. (1983) Process of Formation of Porous Silicon and Autoepitaxy on Its Surface. *Sov. J. Microelectron.* 12, 11–15.
- Yonehara T., Sakaguchi K. (2001) ELTRAN: Novel SOI Wafer Technology. *JSAP Int.* 4, 10–16.
- Lamedica G., Balucani M., Bondarenko V., Franchina L., Dolgyi L., Yakovtseva V., et al. (2000) Investigation of Morphology of Porous Silicon Formed on  $n^+$ -Type Silicon. *J. Porous Mat.* 7, 23–26. <https://doi.org/10.1023/A:1009627412800>.
- Chubenko E., Redko S., Dolgyi A., Bandarenka H., Bondarenko V. (2016) Porous Silicon as Substrate for Epitaxial Films Growth. *Porous Silicon: Opto- and Micro-Electronic Applications*. CRC Press, Taylor and Francis Group, USA. 141–162.
- Canham L. T. (1990) Silicon Quantum Wire Array Fabrication by Electrochemical and Chemical Dissolution of Wafers. *Appl. Phys. Lett.* 57, 1046–1048. <http://dx.doi.org/10.1063/1.103561>.
- Martin-Palma K. J., Costa V. T. (2018) Microscopy of Porous Silicon. *Springer International Publishing AG, Part of Springer Nature*. 572–583. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71381-6\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71381-6_41).
- Chubenko E., Redko S., Dolgyi A., Bandarenka H., Prischepa S., Bondarenko V. (2016) Porous Silicon as Host and Template Material for Composites and Hybrid Materials. *Porous Silicon: Opto- and Microelectronic Applications*. CRC Press, Taylor and Francis Group, USA. 181–205.
- Grevtsov N., Chubenko E., Bondarenko V., Gavrilin I., Dronov A., Gavrilov S. (2021) Electrochemical Deposition of Indium onto Oxidized and Unoxidized Porous Silicon. *Thin Solid Films*. 734 (138860). <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138860>.
- Gavrilin I. M., Grevtsov N. L., Pavlikov A. V., Dronov A. A., Chubenko E. B., Bondarenko V. P., et al. (2022) A New Approach for Producing of Film Structures Based on SiGe. *Mater. Lett.* 313 (131802). <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131802>.
- Grevtsov N., Chubenko E., Bondarenko V., Gavrilin I., Dronov A., Gavrilov S., et al. (2024) Composition-Adjustable Silicon-Germanium Alloy Films Based on Porous Silicon Matrices. *Materials. Today Communications*. 38 (107886). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107886>.
- Haeri Morteza, Haeri Mohammad (2015) ImageJ Plugin for Analysis of Porous Scaffolds Used in Tissue Engineering. *Software Metapapers*. 3 (1). <https://doi.org/10.5334/jors.bn>.

#### Вклад авторов / Authors' contribution

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

#### Сведения об авторах

**Лопато У. П.**, магистрант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

**Лапутько Д. Д.**, магистрант, БГУИР

**Гревцов Н. Л.**, науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Материалы и структуры наноэлектроники» (НИЛ 4.3), БГУИР

**Бондаренко В. П.**, зав. НИЛ 4.3, БГУИР

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-88-54  
E-mail: ulya.lopato@mail.ru  
Лопато Ульяна Павловна

#### Information about the authors

**Lopato U. P.**, Master's Student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

**Laputko D. D.**, Master's Student, BSUIR

**Grevtsov N. L.**, Researcher at the Scientific Research Laboratory "Materials and Structures of Nanoelectronics" (Lab. 4.3), BSUIR

**Bondarenko V. P.**, Head of the Lab. 4.3, BSUIR

#### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-88-54  
E-mail: ulya.lopato@mail.ru  
Lopato Ulyana Pavlovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-26-32>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.357.7

## НАЧАЛЬНЫЕ СТАДИИ ЭЛЕКТРОКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПОКРЫТИЙ ОЛОВОМ И СПЛАВАМИ ОЛОВО-МЕДЬ И ОЛОВО-МЕДЬ-УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЙ АЛМАЗ

И. И. КУЗЬМАР, Д. Ю. ГУЛЬПА, Л. К. КУШНЕР

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

Поступила в редакцию 26.02.2024

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

**Аннотация.** Потребность современной микроэлектроники в разработке технологических процессов формирования наноструктурированных слоев выдвигает необходимость понимания механизмов зарождения и роста осадков. В статье рассмотрены особенности начальных стадий электрокристаллизации покрытий оловом и сплавами олово-медь и олово-медь-ультрадисперсный алмаз. Методом вольтамперометрии исследованы кинетические закономерности электродных процессов. На основе экспериментальных данных рассчитаны параметры зародышеобразования (энергия зародышеобразования, эффективная межфазная поверхностная энергия, радиус и объем зародыша). Получены СЭМ-изображения и изучены особенности шероховатости поверхностей покрытий после осаждения в течение 10, 20, 30 и 60 с. Установлено, что осаждение сплавов олово-медь и олово-медь-ультрадисперсный алмаз повышает значение предельного тока с  $2,8 \cdot 10^{-2}$  до  $5,0 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup>. С ростом перенапряжения электрокристаллизации увеличивается скорость образования зародышей и уменьшается их размер, при этом формируются мелкозернистые и плотные осадки. При увеличении длительности осаждения происходят рост кристаллитов и постепенное срастание их между собой, значение эквивалентного диаметра зерна покрытий увеличивается соответственно для: Sn – с  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $4 \cdot 10^{-6}$  м, Sn-Cu – с  $0,3 \cdot 10^{-6}$  до  $1,3 \cdot 10^{-6}$  м, Sn-Cu-ультрадисперсный алмаз – с  $0,9 \cdot 10^{-6}$  до  $1,4 \cdot 10^{-6}$  м. Установленные закономерности позволяют управлять структурой покрытий и получать осадки с заданными свойствами. Представленные результаты могут быть интересны для специалистов, занимающихся формированием паяемых гальванических покрытий.

**Ключевые слова:** электрохимическое покрытие, олово, олово-медь, ультрадисперсный алмаз, кинетика электродных процессов, рост покрытий.

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

**Благодарность.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках договора № Т22МВ-027 «Исследование процессов зародышеобразования при электроосаждении сплавов олова», Государственной программы научных исследований «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограммы «Гальванотехника», задание 4.01 «Разработка процессов и оборудования для формирования функциональных электрохимических покрытий на основе меди и сплавов олова с улучшенными защитными и эксплуатационными свойствами методами программно-управляемого импульсного электролиза и ультразвукового стимулирования для применения в производстве радиоэлектронной аппаратуры».

**Для цитирования.** Кузьмар, И. И. Начальные стадии электрокристаллизации покрытий оловом и сплавами олово-медь и олово-медь-ультрадисперсный алмаз / И. И. Кузьмар, Д. Ю. Гульпа, Л. К. Кушнер // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 26–32. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-26-32>.

## INITIAL STAGES OF ELECTROCRYSTALLIZATION OF COATINGS WITH TIN AND TIN-COPPER AND TIN-COPPER-ULTRADISPERSE DIAMOND ALLOYS

INA I. KUZMAR, DMITRY Y. GULPA, LARISA K. KUSHNER

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

*Submitted 26.02.2024*

**Abstract.** The need of modern microelectronics in the development of technological processes for the formation of nanostructured layers puts forward the necessity of understanding the mechanisms of nucleation and growth of deposits. The article considers the features of the initial stages of electrocrystallization of coatings with tin and tin-copper and tin-copper-ultradisperse diamond alloys. The kinetic regularities of electrode processes were studied by the voltammetry method. Based on the experimental data, the nucleation parameters (nucleation energy, effective interphase surface energy, radius and volume of the nucleus) were calculated. SEM images were obtained and the features of the roughness of the coating surfaces after deposition for 10, 20, 30 and 60 s were studied. It was found that co-deposition of tin-copper alloys and tin-copper-ultradisperse diamond particles increases the value of the limiting current from  $2.8 \cdot 10^{-2}$  to  $5.0 \cdot 10^{-2}$  A/cm<sup>2</sup>. With an increase in electrocrystallization overvoltage, the rate of nucleation increases and their size decreases, while fine-grained and dense deposits are formed. With an increase in the deposition duration, crystallites grow and gradually coalesce with each other, the value of the equivalent diameter of the grain coatings increases, respectively, for: Sn – from  $1 \cdot 10^{-6}$  to  $4 \cdot 10^{-6}$  m, Sn-Cu – from  $0.3 \cdot 10^{-6}$  to  $1.3 \cdot 10^{-6}$  m, Sn-Cu-ultradispersed diamond – from  $0.9 \cdot 10^{-6}$  to  $1.4 \cdot 10^{-6}$  m. The established patterns make it possible to control the structure of the coatings and obtain deposits with specified properties. The presented results may be of interest to specialists involved in the formation of solderable galvanic coatings.

**Keywords:** electrochemical coating, tin, tin-copper, ultradispersed diamond, kinetics of electrode processes, coating growth.

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

**Gratitude.** The study was sponsored by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research within the framework of contract No T22MV-027 “Study of nucleation processes during electrodeposition of tin alloys”, the State Scientific Research Program “Mechanics, Metallurgy, Diagnostics in Mechanical Engineering”, subprogram “Galvanotechnics”, task 4.01 “Development of processes and equipment for the formation of functional electrochemical coatings based on copper and tin alloys with improved protective and operational properties by methods of program-controlled pulse electrolysis and ultrasonic stimulation, designed to be used in the production of electronic equipment”.

**For citation.** Kuzmar I. I., Gulpa D. Y., Kushner L. K. (2024) Initial Stages of Electrocrystallization of Coatings with Tin and Tin-Copper and Tin-Copper-Ultradisperse Diamond Alloys. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 26–32. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-26-32> (in Russian).

### Введение

Электрохимические покрытия на основе олова широко применяют при производстве полупроводниковых изделий. Для них характерны высокая паяемость, хорошие защитные свойства, низкая стоимость [1]. Чтобы обеспечить качество покрытий и возможность управления структурой, составом и свойствами формируемых тонкопленочных материалов, важно понимание механизма зародышеобразования и роста осадков. В статье исследована кинетика роста покрытий оловом и сплавами олово-медь и олово-медь-ультрадисперсный алмаз (УДА).

### Методика проведения эксперимента

Тонкопленочные структуры получены из электролитов с 2 М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0,2 М SnSO<sub>4</sub>, 0,0259 М неонала АФ9-10, 0,0045 М гидрохинона и 0,02 М CuSO<sub>4</sub> · 5H<sub>2</sub>O (для покрытий Sn-Cu и Sn-Cu-УДА) и 4,24 М ультрадисперсного алмаза (для покрытий Sn-Cu-УДА) [2]. Методом вольтамперометрии с использованием импульсного потенциостата-гальваностата Elins P-45X исследованы кинетические закономерности электродных процессов в электролитах на основе олова в гальваностатическом и гальванодинамическом режимах. Потенциал рабочего электрода измерен относительно

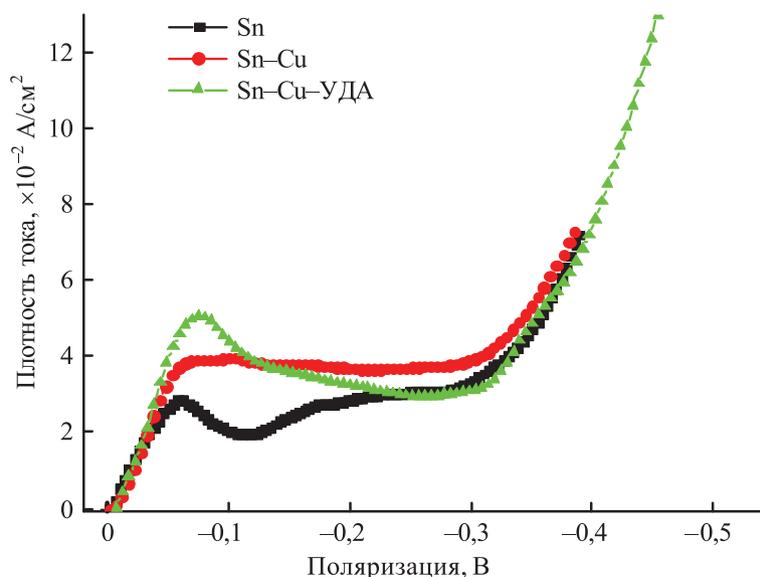
хлорсеребряного электрода сравнения и пересчитан относительно стандартной водородной шкалы. Линейная скорость развертки потенциала 5 мВ/с.

Физико-математическая модель расчета параметров зародышеобразования опиралась на теоретический подход, описанный в [3–5], и реализована в виде программного продукта на языке Java. Исходные данные, необходимые для ввода в программу, получены из зависимости «потенциал – время». Приняли, что максимальное значение перенапряжения  $\eta_m$  для соответствующей плотности тока равно перенапряжению кристаллизации. Массивы данных  $[i_3; \eta_m]$  являются исходными для расчета энергии образования трехмерного зародыша  $E_3$ , эффективной межфазной поверхностной энергии  $\bar{\sigma}$ , которая характеризует степень сродства осаждаемого металла к подложке, скорости образования зародышей, их радиуса  $R_3$  и объема  $V_3$ .

Элементный состав покрытий исследовался рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре ElvaX, микрорельеф покрытий – с помощью растрового электронного микроскопа S-4800. Количественные значения для оценки шероховатости поверхности покрытий получены с использованием программы Gwyddion [6]. Рассчитывали среднюю шероховатость Ra, среднюю максимальную высоту профиля  $R_z$ , максимальную шероховатость от пика до впадины  $R_{max}$ , среднее расстояние между неровностями профиля  $S_m$ , коэффициент асимметрии  $R_{sk}$ .

### Результаты исследований и их обсуждение

Методом электрохимического осаждения получены покрытия оловом (Sn) и сплавами олово-медь (Sn-Cu) (с содержанием меди 1,33–4,52 масс.%) и олово-медь-ультрадисперсный алмаз (Sn-Cu-УДА) (с содержанием меди 0,70–1,80 масс.% и углерода 0,55–2,33 масс.%). Поляризационные кривые, описывающие электродные процессы, происходящие в изучаемых электролитах, представлены на рис. 1.



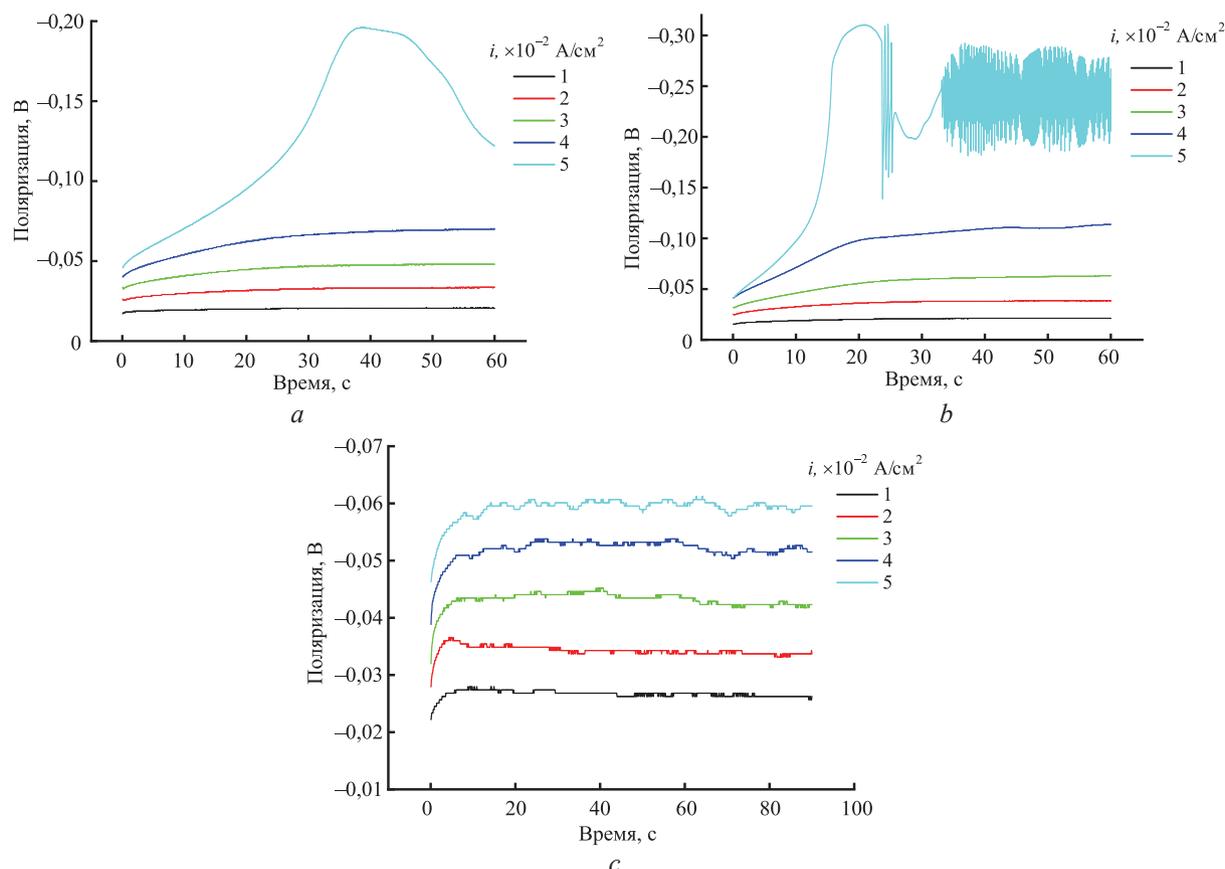
**Рис. 1.** Поляризационные кривые процесса осаждения покрытий на основе олова  
**Fig. 1.** Polarization curves of the tin-based coatings electrodeposition process

Стационарный потенциал поверхности тестового образца (с нанесенным подслоем соответствующего покрытия толщиной 10 мкм) независимо от условий электролиза составлял  $(0,400 \pm 0,005)$  В. Значение предельного тока при оловянировании достигалось при  $2,8 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup>, при осаждении сплавов Sn-Cu и Sn-Cu-УДА – при  $3,9 \cdot 10^{-2}$  и  $5,0 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup> соответственно. Электроосаждение подчиняется законам смешанной кинетики. Рассчитали значения тока обмена  $j_0$  и коэффициента переноса  $\alpha$  (табл. 1). В составе электролитов присутствовали ПАВ, которые образовывали пассивирующую пленку на поверхности катода. На поляризационных кривых наблюдалось образование «плато», когда происходил рост потенциала электрода при значениях тока, близких к предельному. Введение частиц УДА активизировало электродные процессы и влияло на симметричность катодных и анодных процессов.

**Таблица 1.** Кинетические характеристики процесса электроосаждения покрытий на основе олова  
**Table 1.** Kinetic characteristics of the process of electrodeposition of tin-based coatings

Ток обмена $j_0$ , А/см <sup>2</sup>			Коэффициент переноса $\alpha$		
Sn	Sn-Cu	Sn-Cu-УДА	Sn	Sn-Cu	Sn-Cu-УДА
0,086	0,016	0,003	0,300	0,630	0,424

Используя данные гальваностатических исследований (рис. 2) и исходя из условия, что зародыш можно представить в виде шарового сегмента, опираясь на феноменологический подход, представленный в [3], и применив методы наименьших квадратов и регрессионного анализа, рассчитали основные параметры, характеризующие процесс зародышеобразования и кристаллизации электрохимических покрытий. Результаты расчета приведены в табл. 2.



**Рис. 2.** Хронопотенциограммы, полученные при осаждении покрытий на основе олова:  
*a* – Sn; *b* – Sn-Cu; *c* – Sn-Cu-ультрадисперсный алмаз

**Fig. 2.** Chronopotentiograms obtained during the deposition of tin-based coatings:  
*a* – Sn; *b* – Sn-Cu; *c* – Sn-Cu-ultradispersed diamond

**Таблица 2.** Параметры электрохимического процесса зародышеобразования покрытий  
**Table 2.** Parameters of the electrochemical process of coating nucleation

Плотность тока, $\times 10^{-2}$ А/см <sup>2</sup>	Перенапряжение кристаллизации, В	Энергия зародышеобразования, В	Эффективная межфазная поверхностная энергия, н/м	Радиус зародыша, нм
Sn				
1	0,021	89,18	6,89	50
2	0,038	55,76	5,04	22
3	0,480	39,09	3,98	12
4	0,070	26,67	3,08	7
5	0,192	9,57	1,56	1

Окончание табл. 2  
Ending of Tab. 2

Плотность тока, $\times 10^{-2}$ А/см <sup>2</sup>	Перенапряжение кристаллизации, В	Энергия зародышеобразования, В	Эффективная межфазная поверхностная энергия, н/м	Радиус зародыша, нм
Sn-Cu				
1	0,026	71,61	5,65	36
2	0,043	43,24	4,04	15
3	0,068	27,57	2,99	7
4	0,119	15,84	2,07	3
5	0,316	5,944	1,08	1
Sn-Cu-УДА				
1	0,029	64,883	5,260	30
2	0,038	50,013	4,420	20
3	0,046	40,680	3,850	14
4	0,055	34,290	3,440	11
5	0,062	30,180	3,160	8

Установлено, что чем выше плотность тока, тем меньше энергия зародышеобразования. При плотностях тока более предельного значения характерно резкое уменьшение энергии зародышеобразования. С ростом перенапряжения в процессе электрокристаллизации металлов увеличивается скорость образования зародышей и уменьшается их размер, что способствует формированию мелкозернистых и плотных осадков на основе олова. Введение в электролит меди и ультрадисперсного алмаза изменяет значение энергии зародышеобразования. При плотности тока  $4 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup> значение  $E_3$  соответственно равно: для Sn – 26,67 В, для Sn-Cu – 15,84 В, для Sn-Cu-УДА – 34,29 В.

Для исследования постадийного роста электрохимические покрытия осаждали при плотности тока  $1 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup> в течение 10, 20, 30 и 60 с. В табл. 3 представлены параметры шероховатости поверхности, а на рис. 3 – снимки морфологии поверхности изучаемых осадков.

**Таблица 3.** Параметры шероховатости поверхности покрытий на основе олова  
**Table 3.** Surface roughness parameters of tin-based coatings

Время осаждения, с	Ra, нм	R <sub>z</sub> , нм	R <sub>max</sub> , нм	S <sub>m</sub> , нм	R <sub>sk</sub>
Sn					
10	87	501	652	236	-0,494
20	74	465	658	250	0,362
30	64	373	415	187	0,311
60	40	278	332	128	-0,180
Sn-Cu					
10	129	622	696	715	-0,288
20	62	447	465	384	-0,654
30	61	286	519	477	-0,180
60	50	274	288	371	-0,117
Sn-Cu-УДА					
10	82	470	831	435	-0,945
20	64	348	538	589	-1,060
30	60	308	591	525	-0,543
60	30	158	241	278	-0,331

В течение первых 10 с возникали отдельные неоднородные по размерам кристаллиты. Эквивалентный диаметр зерна изменялся в зависимости от вида покрытия от  $0,3 \cdot 10^{-6}$  до  $1,03 \cdot 10^{-6}$  м. В процессе дальнейшего электролиза наблюдались линейный рост ранее появившихся кристаллитов и их слияние в более крупные однородные по размеру образования. При увеличении длительности осаждения от 10 до 60 с размер кристаллитов увеличивался с постепенным сращиванием их между собой до полного заполнения подложки. Формировались крупные кластеры. Уменьшались значения средней шероховатости Ra и происходило сглаживание поверхности. При длительности осаждения 60 с эквивалентный диаметр зерна покрытий увеличивался:

для Sn – с  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $4 \cdot 10^{-6}$  м, для Sn-Cu – с  $0,3 \cdot 10^{-6}$  до  $1,3 \cdot 10^{-6}$  м, для Sn-Cu-УДА – с  $0,9 \cdot 10^{-6}$  до  $1,4 \cdot 10^{-6}$  м.

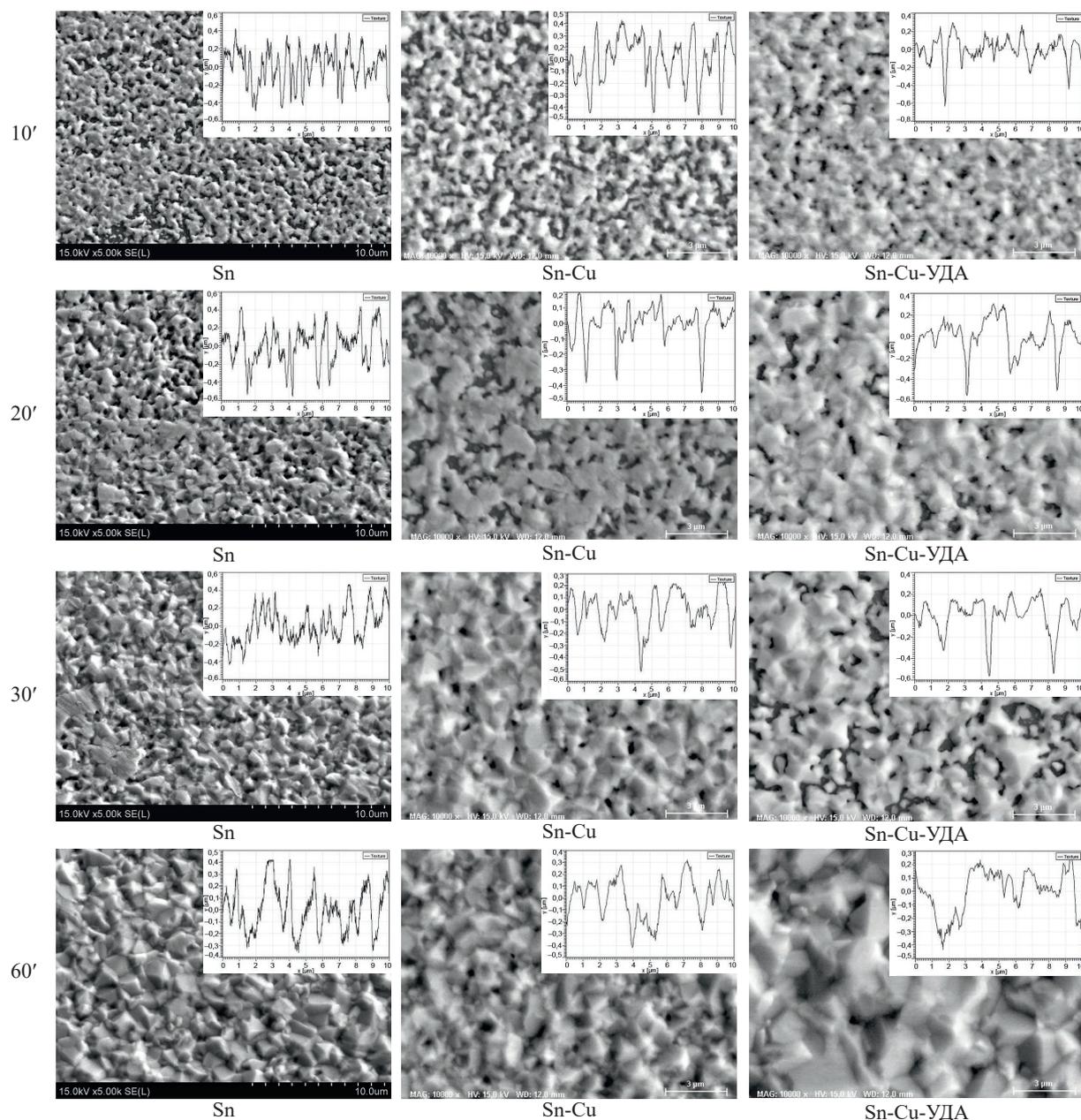


Рис. 3. Морфология поверхности покрытий на основе олова, полученных при разном времени осаждения  
Fig. 3. Surface morphology of tin-based coatings obtained at different deposition times

### Заключение

1. Изучены начальные стадии электрокристаллизации покрытий оловом и сплавами олово-медь и олово-медь-ультрадисперсный алмаз. Исследованы стадии роста покрытий на основе олова.

2. Установлено, что образование сплошного осадка происходит по механизму срастания островковых структур. В первые несколько секунд процесса на подложке зарождаются отдельные кристаллиты, затем кристаллиты укрупняются с образованием между ними мостиков, начинают срастаться между собой и постепенно сливаются в крупные кристаллические агрегаты.

3. Выявленные взаимосвязи между составом электролита, условиями электролиза и качественными и количественными показателями морфологии поверхности тонкопленочных структур позволяют оптимизировать условия формирования покрытий с заданными свойствами.

### Список литературы

1. Контактно-барьерные структуры субмикронной электроники / А. П. Достанко [и др.]. Минск: Бест-принт, 2021.
2. Гульпа, Д. Ю. Нестационарный электролиз сплава олово-медь / Д. Ю. Гульпа, И. И. Кузьмар, Л. К. Кушнер // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 8. С. 21–27. <http://dx.doi.org/10.35596/17297648-2022-20-8-21-27>.
3. О применении метода гальваностатического включения при исследовании электрокристаллизации на чужеродной подложке / В. М. Рудой [и др.] // Электрохимия. 1975. Т. 11, № 4. С. 566–570.
4. Белоцкий, И. П. Расчет параметров зародышеобразования при формировании электрохимических покрытий / И. П. Белоцкий, Д. Ю. Гульпа, А. В. Левко // Электронные системы и технологии: сб. тез. докл. 57-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов Белор. гос. ун-та информ. и радиоэлек., г. Минск, 19–23 апреля 2021 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2021. С. 155–157.
5. Антропов, Л. И. Теоретическая электрохимия / Л. И. Антропов. М.: Высш. шк., 1984.
6. Руководство пользователя Gwyddion [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gwyddion.net/documentation/>. Дата доступа: 15.02.2024.

### References

1. Dostanko A. P., Bogush N. V., Bordusov S. V., Vasilevich V. P., Gulpa D. V., Zbyshinskaya M. E., et al. (2021) *Contact-Barrier Structures of Submicron Electronics*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
2. Gulpa D. Y., Kuzmar I. I., Kushner L. K. (2022) Non-Stationary Electrolysis of a Tin-Copper Alloy. *Doklady BGUIR*. 20 (8), 21–27. <http://dx.doi.org/10.35596/17297648-2022-20-8-21-27> (in Russian).
3. Rudoy V. M., Samoylenko V. N., Kanzler E. V., Levin A. I. (1975) On the Application of the Galvanostatic Switching Method in the Study of Electrocrystallization on a Foreign Substrate. *Electrochemistry*. 11 (4), 566–570 (in Russian).
4. Belotsky I. P., Gulpa D. Yu., Levko A. V. (2021) Calculation of Nucleation Parameters During the Formation of Electrochemical Coatings. *Electronic Systems and Technologies, Collection of Abstracts of Reports of the 57<sup>th</sup> Scientific Conference of Postgraduate Students, Master's Students and Students of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Apr. 19–23*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 155–157 (in Russian).
5. Anthropov L. I. (1984) *Theoretical Electrochemistry*. Moscow, Higher School Publ. (in Russian).
6. *Gwyddion User Guide*. Available: <http://gwyddion.net/documentation/> (Accessed 15 February 2024).

### Вклад авторов / Authors' contribution

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

### Сведения об авторах

**Кузьмар И. И.**, канд. техн. наук, зав. науч.-исслед. лаб. «Функциональные пленочные системы» (НИЛ 2.2), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

**Гульпа Д. Ю.**, мл. науч. сотр. НИЛ 2.2, БГУИР

**Кушнер Л. К.**, ст. науч. сотр. НИЛ 2.2, БГУИР

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-88-98  
E-mail: [kuzmar@bsuir.by](mailto:kuzmar@bsuir.by)  
Кузьмар Инна Иосифовна

### Information about the authors

**Kuzmar I. I.**, Cand. of Sci., Head of the Scientific Research Laboratory “Functional Film Systems” (Lab. 2.2), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

**Gulpa D. Y.**, Junior Researcher at the Lab. 2.2, BSUIR

**Kushner L. K.**, Senior Researcher at the Lab. 2.2, BSUIR

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-88-98  
E-mail: [kuzmar@bsuir.by](mailto:kuzmar@bsuir.by)  
Kuzmar Ina Iosifovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-33-42>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.382

## СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В БИПОЛЯРНЫХ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМАХ

О. В. ДВОРНИКОВ<sup>1</sup>, В. А. ЧЕХОВСКИЙ<sup>2</sup>, И. Ю. ЛОВШЕНКО<sup>3</sup>, ЧОНГ ТХАНЬ НГУЕН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>3</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 29.07.2024

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

**Аннотация.** Одним из факторов, вызывающих потерю работоспособности интегральных микросхем космических аппаратов, является воздействие тяжелых заряженных частиц. Попадание их в электронные устройства приводит к появлению одиночных переходных процессов (коротких токовых импульсов), которые в аналоговых микросхемах проявляются в искажении формы выходных сигналов, а в цифровых микросхемах могут вызвать одиночный сбой. В статье рассмотрена методика схемотехнического моделирования воздействия тяжелых заряженных частиц на биполярные аналоговые микросхемы, включающая разработанную эквивалентную электрическую схему биполярного транзистора для LTSpice и порядок проведения моделирования переходных процессов. Несмотря на принятые упрощения, а именно – отсутствие учета зависимости длительности фронта нарастания и спада генерируемого заряженной частицей токового импульса от параметров транзисторной структуры, на допущения о том, что весь заряд генерируется в активной базе и областях пространственного заряда эмиттерного и коллекторного переходов, – разработанная эквивалентная схема позволила определить, что форма коллекторного токового импульса схемы с общим эмиттером при воздействии тяжелой заряженной частицы определяется быстродействием транзистора и его режимом работы. С применением разработанной методики определены «критические» транзисторы двух изученных аналоговых микросхем, а также обоснована необходимость шунтирования токозадающих резисторов конденсатором небольшой емкости.

**Ключевые слова:** проникающая радиация, одиночные переходные процессы, линейная передача энергии, радиационная стойкость.

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

**Для цитирования.** Схемотехническое моделирование воздействия тяжелых заряженных частиц на переходные процессы в биполярных аналоговых микросхемах / О. В. Дворников [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 33–42. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-33-42>.

## CIRCUIT MODELING OF THE IMPACT OF HEAVY CHARGED PARTICLES ON TRANSIENT PROCESSES IN BIPOLAR ANALOG MICROCIRCUITS

OLEG V. DVORNIKOV<sup>1</sup>, VLADIMIR A. TCHEKHOVSKI<sup>2</sup>, IVAN YU. LOVSHENKO<sup>3</sup>,  
TRONG THANH NGUYEN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>JSC “Minsk Research Instrument-Making Institute” (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup>Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>3</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 29.07.2024

**Abstract.** One of the factors causing the failure of spacecraft integrated circuits is exposure to heavy charged particles. The entry of heavy charged particles into electronic devices leads to the appearance of single event transients (short current pulses), which in analog microcircuits manifest themselves in distortion of the output signal shape, and in digital microcircuits can cause a single event upset. The article discusses a technique for circuit modeling of the effect of heavy charged particles on bipolar analog microcircuits, including the developed equivalent electrical circuit of a bipolar transistor for LTSpice and the procedure for modeling transient processes. Despite the simplifications adopted, namely: failure to take into account the dependence of the duration of the rise and fall of the current pulse generated by a charged particle on the parameters of the transistor structure, the assumption that the entire charge is generated in the active base and the space charge regions of the emitter and collector junctions, an equivalent circuit has been developed made it possible to determine that the shape of the collector current pulse for circuit with a common emitter when exposed to a heavy charged particle is determined by the speed of the transistor and its operating mode. Using the developed methodology, the “critical” transistors of the two studied analog microcircuits were determined, and the need to bypass the current-setting resistors with a small capacitor was justified.

**Keywords:** penetrating radiation, single event transients, linear energy transfer, radiation resistance.

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

**For citation.** Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A., Lovshenko I. Yu., Trong Thanh Nguyen (2024) Circuit Modeling of the Impact of Heavy Charged Particles on Transient Processes in Bipolar Analog Microcircuits. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 33–42. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-33-42> (in Russian).

### Введение

Воздействие проникающей радиации существенно влияет на работоспособность электронных устройств и может привести как к катастрофическим, так и к параметрическим отказам. К основным составляющим проникающей радиации космического пространства можно отнести гамма-излучение, потоки нейтронов и заряженных частиц, а также отдельные тяжелые заряженные частицы (heavy charged particle, НСР). Воздействие НСР на интегральные микросхемы приводит к появлению так называемых одиночных переходных процессов (single event transients, SET), которые в аналоговых микросхемах проявляются в искажении формы выходных сигналов, а в цифровых устройствах могут вызвать изменение уровня логических вентилях, т. е. одиночный сбой [1, 2].

Важность учета влияния НСР на микросхемы космических аппаратов объясняет большое количество работ, направленных на:

– приборно-технологическое моделирование формы SET для разных транзисторных структур [3–7];

– изучение SET в разных схемах включения и режимах работы МОП и биполярных транзисторов [8–12];

– исследование SET в функционально завершенных аналоговых компонентах: компараторах, операционных усилителях (ОУ) [13–19].

На основе результатов изучения SET в ОУ LM124 и компараторе LM139 [14, 15, 19] можно предположить, что выходной импульс в функционально завершенных аналоговых компонентах в большей степени определяется местом расположения на схеме активного элемента, на который воздействует НСР, зарядом, генерируемым НСР в интегральных элементах, быстродействием

транзисторов и емкостью применяемых в схеме конденсаторов, а в меньшей степени – длительностью фронта нарастания и спада вызванного НСР токового импульса. С учетом изложенного в процессе исследования рассмотрена упрощенная методика схемотехнического моделирования воздействия НСР на биполярные аналоговые микросхемы.

### Учет влияния тяжелой заряженной частицы на одиночные переходные процессы

В [2, 4] предложено вызванный НСР токовый импульс  $I(t)$  описывать выражением

$$I(t) = \frac{Q_D}{\tau_F - \tau_R} \left( \exp \frac{-t}{\tau_F} - \exp \frac{-t}{\tau_R} \right), \quad (1)$$

где  $Q_D$  – генерируемый НСР заряд

$$Q_D = \frac{qLET_p \rho D}{I_F}; \quad (2)$$

$\tau_F, \tau_R$  – постоянная времени спада и нарастания токового импульса;  $t$  – время, Кл;  $q$  – заряд электрона;  $LET_p$  – линейная передача энергии (Linear Energy Transfer), МэВ/(г/см<sup>2</sup>);  $\rho$  – плотность полупроводника;  $D$  – глубина проникновения НСР;  $I_F$  – энергия первичной ионизации, эВ, для кремния 3,62 эВ.

На основе (1) разработана эквивалентная электрическая схема  $n-p-n$ -транзистора для программного обеспечения LTSpice (рис. 1), учитывающая воздействие НСР.

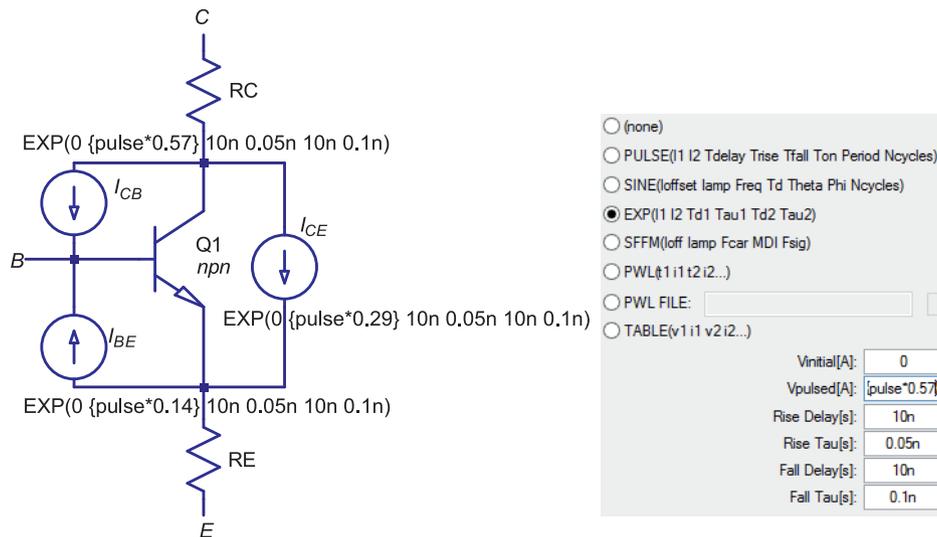
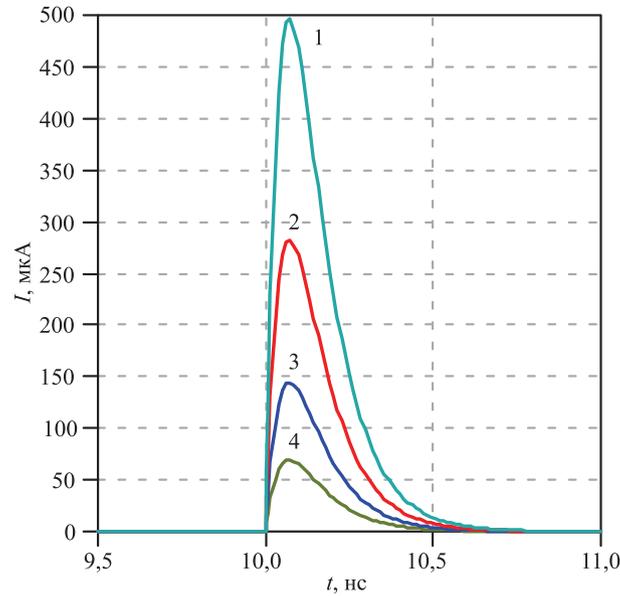


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема  $n-p-n$  в LTSpice, учитывающая воздействие тяжелых заряженных частиц

Fig. 1. Equivalent electrical circuit  $n-p-n$  in LTSpice, taking into account impact of heavy charged particles

В соответствии с рис. 1 токовый импульс поступает в момент времени  $t = 10$  нс, максимальное значение импульса устанавливается с помощью глобального параметра Pulse, типовые значения постоянных времени составляют  $\tau_F = 0,10$  нс и  $\tau_R = 0,05$  нс [2], распределение суммарного генерируемого заряда между активной базой  $I_{CE}$ , областью пространственного заряда эмиттерного  $I_{BE}$  и коллекторного  $I_{CB}$  переходов выполнено в соответствии с их толщинами за счет введения множителя перед глобальным параметром Pulse. На рис. 2 показана форма суммарного токового импульса и тока через все источники на рис. 1. При этом суммарный заряд составлял 100 фКл и обеспечивался при Pulse = 2 мА. Заметим, что ширина всех импульсов на половине их высоты была около 180 пс, а величина суммарного заряда устанавливалась при моделировании переходных процессов подбором параметра Pulse по заряду суммарным током тестового конденсатора емкостью 1 пФ.



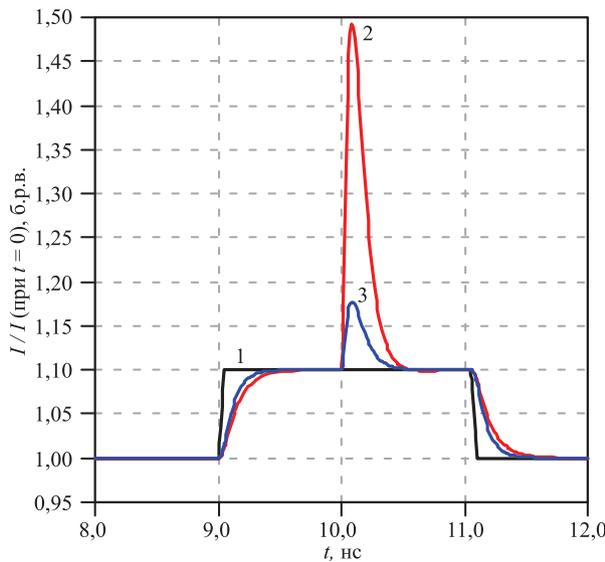
**Рис. 2.** Форма токового импульса, описывающего воздействие тяжелых заряженных частиц:

1 – суммарный при  $Q_D = 100$  фКл; 2, 3, 4 – источников  $I_{CB}$ ,  $I_{CE}$ ,  $I_{EB}$  соответственно

**Fig. 2.** Shape of the current pulse describing the impact of heavy charged particles:

1 – total at  $Q_D = 100$  fC; 2, 3, 4 – sources  $I_{CB}$ ,  $I_{CE}$ ,  $I_{EB}$ , respectively

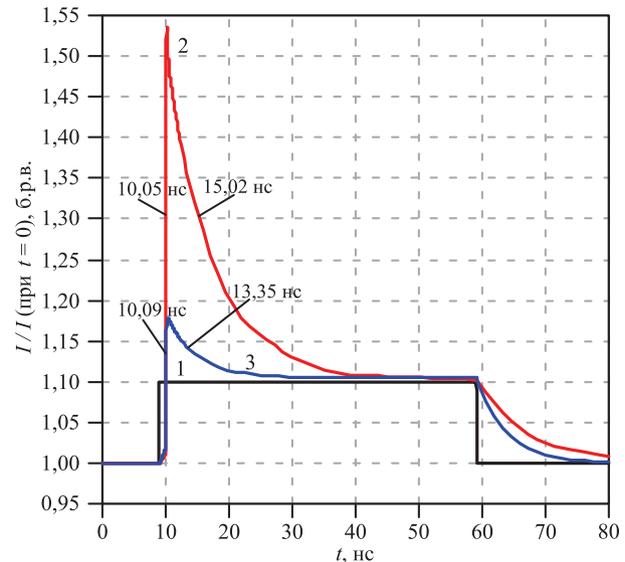
Влияние НСР на переходные характеристики (TRAN-анализ)  $n-p-n$ -транзистора в схеме включения с общей базой (ОБ) и общим эмиттером (ОЭ) при разной величине коллекторного тока иллюстрируют рис. 3, 4. На этих рисунках и далее токовый импульс поступает в момент времени  $t = 10$  нс, а входной сигнал (ступенька эмиттерного тока в схеме с ОБ, базового тока в схеме с ОЭ, напряжения для компаратора и ОУ) – в момент времени  $t = 9$  нс.



**Рис. 3.** Нормированный токовый импульс в схеме с общей базой при воздействии тяжелых заряженных частиц с  $Q_D = 10$  фКл:

1 –  $I_E(t)/I_E(0)$ ; 2 –  $I_C(t)/I_C(0)$  при  $I_C(0) \approx 100$  мкА;  
3 –  $I_C(t)/I_C(0)$  при  $I_C(0) \approx 500$  мкА

**Fig. 3.** Normalized current pulse in a common base circuit under the influence of heavy charged particles with  $Q_D = 10$  fC: 1 –  $I_E(t)/I_E(0)$ ; 2 –  $I_C(t)/I_C(0)$  at  $I_C(0) \approx 100$   $\mu$ A; 3 –  $I_C(t)/I_C(0)$  at  $I_C(0) \approx 500$   $\mu$ A



**Рис. 4.** Нормированный токовый импульс в схеме с общим эмиттером при воздействии тяжелых заряженных частиц с  $Q_D = 10$  фКл:

1 –  $I_B(t)/I_B(0)$ ; 2 –  $I_C(t)/I_C(0)$  при  $I_C(0) \approx 100$  мкА;  
3 –  $I_C(t)/I_C(0)$  при  $I_C(0) \approx 500$  мкА

**Fig. 4.** Normalized current pulse in a common emitter circuit under the influence of heavy charged particles with  $Q_D = 10$  fC: 1 –  $I_B(t)/I_B(0)$ ; 2 –  $I_C(t)/I_C(0)$  at  $I_C(0) \approx 100$   $\mu$ A; 3 –  $I_C(t)/I_C(0)$  at  $I_C(0) \approx 500$   $\mu$ A

Для обеспечения одинакового рабочего режима транзисторов при моделировании SET эмиттерный ток в схеме с ОБ устанавливался на уровне 100 и 500 мкА, а коллекторный ток в схеме с ОЭ задавался в пределах  $100 \text{ мкА} \pm 5\%$  и  $500 \text{ мкА} \pm 5\%$  при помощи генератора базового тока. Ступенька тока для схем с ОБ и ОЭ составляла 10 % от величин начального тока  $I_E(0)$  и  $I_B(0)$ .

Как следует из рис. 4, форма коллекторного токового импульса для наиболее применяемой схемы с ОЭ определяется в большей степени быстродействием транзистора и его режимом работы, чем формой токового импульса, вызванного НСР. Влияние НСР на аналоговые компоненты изучалось для схем компаратора ADComp3 (рис. 5) и ОУ OAm9M (рис. 6), подробно описанных в [20, 21].

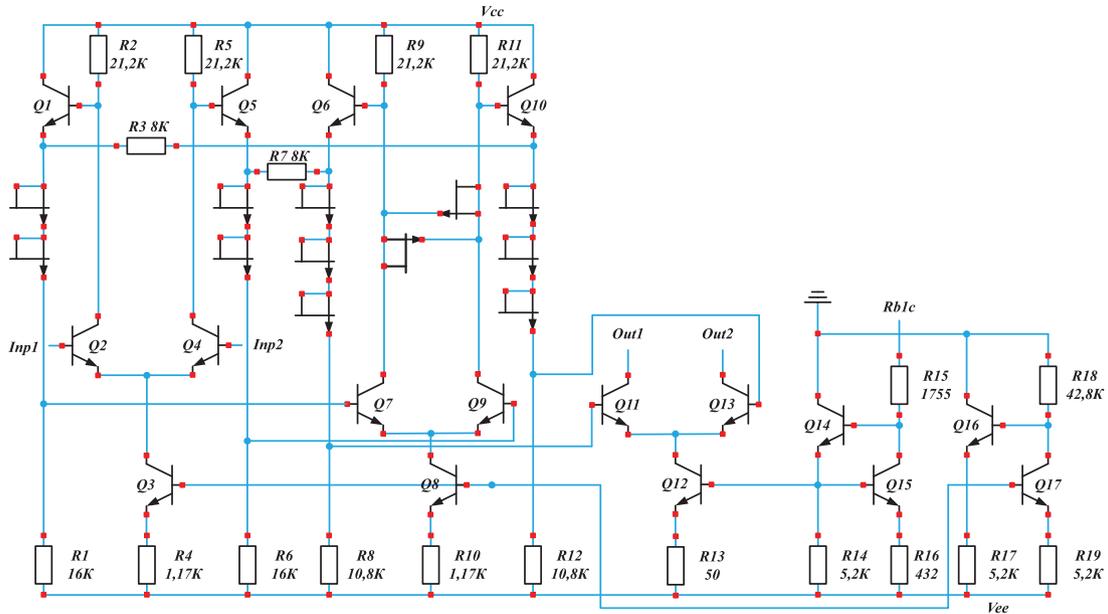


Рис. 5. Электрическая схема компаратора ADComp3  
Fig. 5. Electrical circuit of the ADComp3 comparator

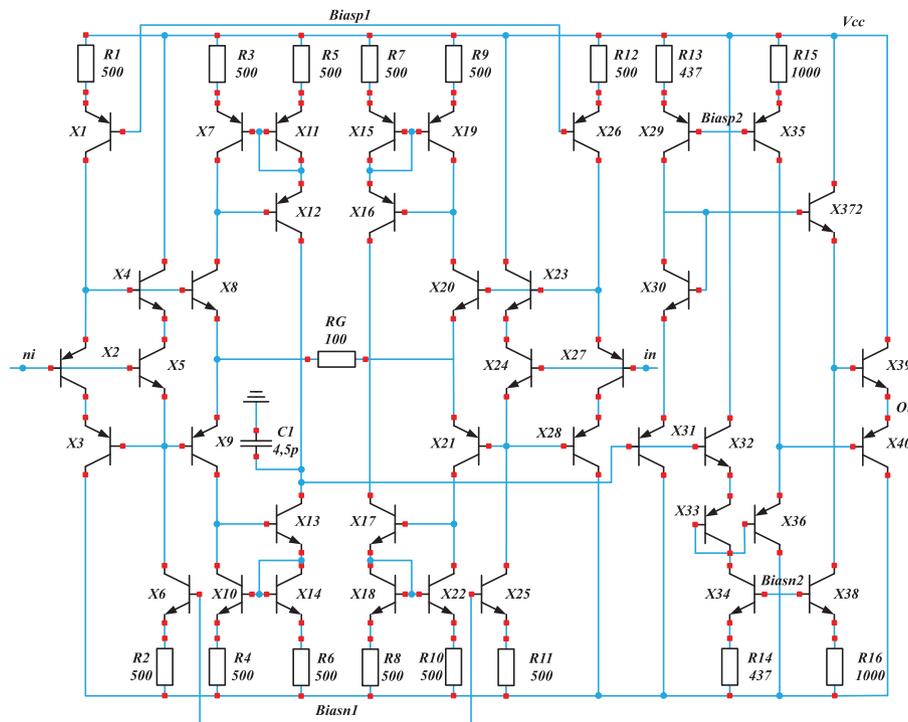


Рис. 6. Электрическая схема операционных усилителей OAm9M без блока смещения, задающего напряжение в узлах Biasn1, Biasn2, Biasp1, Biasp2  
Fig. 6. Electrical diagram of operational amplifiers of the OAm9M op-amp without a bias block that sets the voltage in the nodes Biasn1, Biasn2, Biasp1, Biasp2

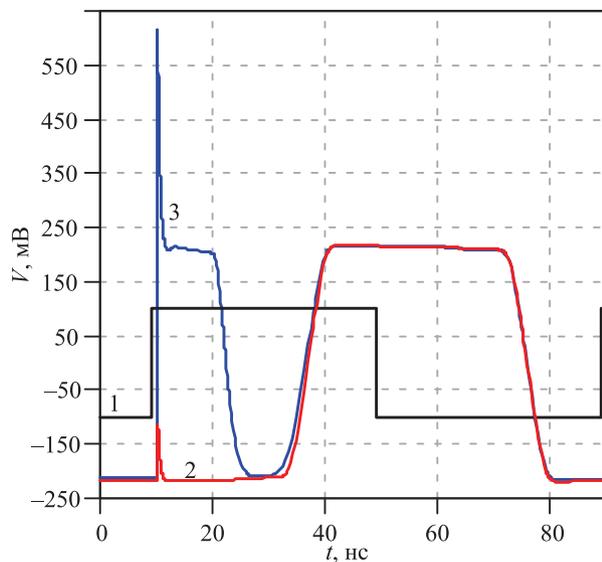
При моделировании транзисторы схем поочередно заменялись на эквивалентную схему рис. 1 для  $n-p-n$ -транзистора и аналогичную ей для  $p-n-p$ , одновременно с TRAN-анализом выполнялся параметрический анализ с изменением глобального параметра Pulse в пределах от 200 мкА до 200 мА (по директиве .step param pulse list 200u 2m 20m 200m), что соответствовало суммарному генерируемому заряду в диапазоне от 10 фКл до 10 пКл, регистрировался импульс на выходе устройств и определялся суммарный заряд, при котором устройство неправильно функционировало. При этом выходной сигнал компаратора определялся между узлами Out1 и Out2, соединенными через 50-омные резисторы с шиной нулевого потенциала, а выходным сигналом OAmpr9M был импульс напряжения в узле Ou при соединении ОУ по схеме неинвертирующего повторителя напряжения.

Моделирование позволило установить, что:

- наличие внутренней обратной связи в компараторе, реализованной на резисторах R3, R7, приводит к тому, что попадание НСР в любой из транзисторов первого и второго дифференциального каскада практически не влияет на форму выходного сигнала. Только воздействие НСР на выходные транзисторы Q11, Q13 приводит к потере работоспособности (рис. 7, кривая 3 показывает удвоение выходного импульса) при воздействии частицы с зарядом 10 пКл;

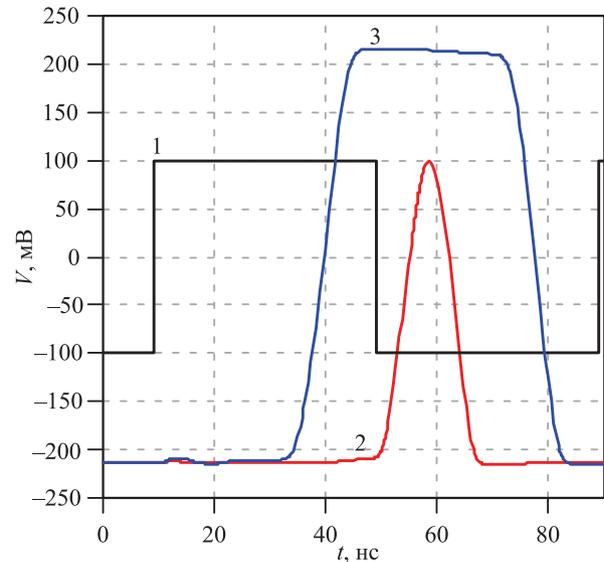
- наиболее существенно на работоспособность компаратора влияет воздействие НСР на транзисторы блока смещения (рис. 5, Q17). При воздействии НСР с зарядом 2 пКл на Q17 компаратор теряет свою работоспособность (рис. 8, кривая 2), которая может быть восстановлена при шунтировании токозадающего резистора R18 конденсатором с небольшой емкостью, около 15 пФ (рис. 8, кривая 3);

- наиболее критичным для ОУ OAmpr9M является воздействие НСР на транзистор X13 (рис. 9, кривая 3), соединенный с самым высокоимпедансным узлом схемы, что требует либо ограничить допустимый заряд НСР на уровне 1 пКл, либо провести схемотехническую модернизацию ОУ.



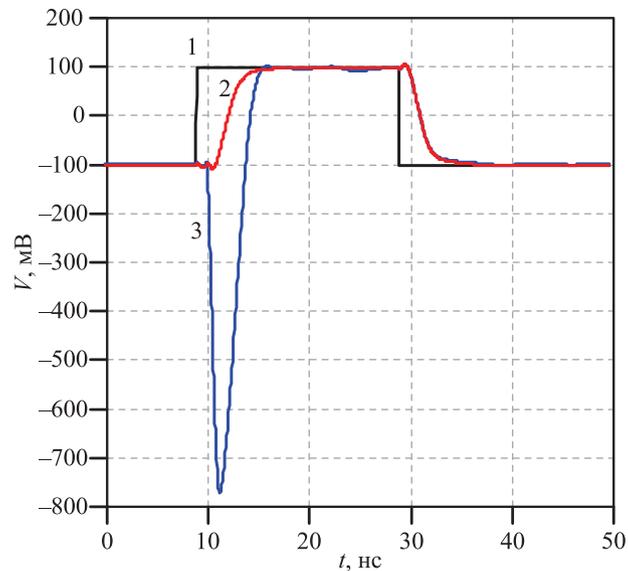
**Рис. 7.** Импульсы напряжения компаратора ADComp3: 1 – между входами Inp1 и Inp2; 2, 3 – между выходами Out1 и Out2 при воздействии тяжелых заряженных частиц на Q11 с  $Q_D = 1$  пКл и  $Q_D = 10$  пКл соответственно

**Fig. 7.** ADComp3 comparator voltage pulses: 1 – between Inp1 and Inp2 inputs; 2, 3 – between outputs Out1 and Out2 when exposed to heavy charged particles on Q11 with  $Q_D = 1$  pC and  $Q_D = 10$  pC, respectively



**Рис. 8.** Импульсы напряжения компаратора ADComp3: 1 – между входами Inp1 и Inp2; 2 – между выходами Out1 и Out2 при воздействии тяжелых заряженных частиц с  $Q_D = 2$  пКл на Q17; 3 – при воздействии тяжелых заряженных частиц с  $Q_D = 2$  пКл на Q17 и включении фильтрующего конденсатора 15 пФ

**Fig. 8.** ADComp3 comparator voltage pulses: 1 – between Inp1 and Inp2 inputs; 2 – between outputs Out1 and Out2 when exposed to heavy charged particles with  $Q_D = 2$  pC on Q17; 3 – when exposed to heavy charged particles with  $Q_D = 2$  pC on Q17 and the connection of a 15 pF filter capacitor



**Рис. 9.** Импульсы напряжения операционного усилителя OAm9M при его соединении в режиме повторителя напряжения: 1 – между входами Ni и In; 2, 3 – на выходе Ou при воздействии тяжелых заряженных частиц на X13 с  $Q_D = 1$  пКл и  $Q_D = 10$  пКл соответственно

**Fig. 9.** Operational amplifier voltage pulses of the OAm9M op amp when connected in voltage follower: 1 – between the inputs Ni and In; 2, 3 – at the output Ou under the influence of heavy charged particles on X13 with  $Q_D = 1$  pC and  $Q_D = 10$  pC, respectively

Несмотря на принятые упрощения, а именно – отсутствие учета зависимости длительности фронта нарастания и спада генерируемого НСР токового импульса от параметров транзисторной структуры, на допущения о том, что весь заряд генерируется в активной базе и областях пространственного заряда эмиттерного и коллекторного переходов, – эквивалентная схема биполярного транзистора с включенными параллельно переходам и промежутку коллектор-эмиттер экспоненциальными источниками тока позволяет выполнить схемотехническое моделирование воздействия НСР на биполярные аналоговые микросхемы.

### Заключение

1. Разработана эквивалентная электрическая схема биполярного транзистора для LTSpice, учитывающая воздействие тяжелых заряженных частиц. Применение ее при моделировании SET в  $n-p-n$ -транзисторе показало, что форма коллекторного токового импульса для наиболее применяемой схемы с общим эмиттером определяется в большей степени быстродействием транзистора и его режимом работы, чем формой токового импульса, вызванного тяжелыми заряженными частицами.

2. Для оценки влияния тяжелых заряженных частиц на компаратор ADComp3 и операционный усилитель OAm9M транзисторы аналоговых устройств поочередно заменялись на разработанную эквивалентную схему, одновременно с TRAN-анализом выполнялся параметрический анализ с изменением суммарного генерируемого тяжелыми заряженными частицами заряда в диапазоне от 10 фКл до 10 пКл и регистрировался импульс на выходе устройств, что позволило определить наиболее «критические» элементы, оценить «для наихудшего случая» уровень допустимого заряда генерируемого тяжелыми заряженными частицами, сформулировать требования к схемотехнической модернизации, в том числе необходимость шунтирования токозадающих резисторов конденсатором небольшой емкости.

### Список литературы

1. Perez, R. Methods for Spacecraft Avionics Protection Against Space Radiation in the Form of Single-Event Transients / R. Perez // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2008. Vol. 50, No 3. P. 455–465. <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2008.927735>.

2. Perez, R. Analysis and Simulations of Space Radiation Induced Single Event Transients / R. Perez // 2016 ESA Workshop on Aerospace EMC. 2016. P. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/AeroEMC.2016.7504569>.
3. Ловшенко, И. Ю. Моделирование воздействия тяжелой заряженной частицы на электрические характеристики приборной структуры *n*-МОП-транзистора / И. Ю. Ловшенко, В. П. Стемпицкий, В. Т. Шандарович // Доклады БГУИР. 2020. Т. 18, №. 7. С. 55–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-55-62>.
4. Comparison of the Transient Current Shapes Obtained with the Diffusion Model and the Double Exponential Law – Impact on the SER / F. Wrobel [et al.] // 2013 14<sup>th</sup> European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. 2013. P. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1109/RADECS.2013.6937441>.
5. Efficient Method for Estimating the Characteristics of Radiation-Induced Current Transients / W. G. Bennett [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2012. Vol. 59, No 6. P. 2704–2709. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2012.2218830>.
6. The Effects of Temperature on the Single-Event Transient Response of a High-Voltage (>30 V) Complementary SiGe-on-SOI Technology / A. P. Omprakash [et al.] // in IEEE Transactions on Nuclear Science. 2019. Vol. 66, No 1. P. 389–396. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2018.2886577>.
7. Single-Event Upset Mitigation in a Complementary SiGe HBT BiCMOS Technology / N. E. Lourenco [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2018. Vol. 65, No 1. P. 231–238. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2017.2778803>.
8. Load Resistor as a Worst-Case Parameter to Investigate Single-Event Transients in Analog Electronic Devices / I. López-Calle [et al.] // Proceedings of the 8<sup>th</sup> Spanish Conference on Electron Devices, CDE'2011. 2011. P. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1109/SCED.2011.5744202>.
9. An Electrostatic Discharge Protection Circuit Technique for the Mitigation of Single-Event Transients in SiGe BiCMOS Technology / M. K. Cho [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2018. Vol. 65, No 1. P. 426–431. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2017.2778946>.
10. An Investigation of Single-Event Transients in C-SiGe HBT on SOI Current Mirror Circuits / S. Jung [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2014. Vol. 61, No 6. P. 3193–3200. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2014.2358207>.
11. Modeling the Dependence of Single-Event Transients on Strike Location for Circuit-Level Simulation / L. Ding [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2019. Vol. 66, No 6. P. 866–874. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2019.2904716>.
12. The Role of Negative Feedback Effects on Single-Event Transients in SiGe HBT Analog Circuits / J. Seungwoo [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2015. Vol. 62, No 6. P. 2599–2605. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2015.2498540>.
13. Study of Single-Event Transients in High-Speed Operational Amplifiers / P. Jaulent [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2008. Vol. 55, No 4. P. 1974–1981. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2008.920265>.
14. Circuit Modeling of the LM124 Operational Amplifier for Analog Single-Event Transient Analysis / Y. Boulghassoul [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2002. Vol. 49, No 6. P. 3090–3096. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2002.805400>.
15. Liu, J. Simulations for Single Event Transient Effects in the LM124 Operational Amplifier / J. Liu // 2019 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems. 2019. P. 552–555. <http://dx.doi.org/10.1109/ICICAS48597.2019.00121>.
16. Analysis of Two-Stage CMOS Op-Amp for Single-Event Transients / H. Langalia [et al.] // 2012 International Conference on Communication, Information & Computing Technology. 2012. P. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1109/ICCICT.2012.6398149>.
17. Single-Event Transient Response of Comparator Pre-Amplifiers in a Complementary SiGe Technology / A. Ildefonso [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2017. Vol. 64, No 1. P. 89–96. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2016.2619582>.
18. Modeling and Analysis of Analog Single Event Transients in an Amplifier Circuit / Y. Wang [et al.] // 2013 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics. 2013. P. 94–97. <http://dx.doi.org/10.1109/ICoOM.2013.6626499>.
19. Simulations of Single Event Transient Effects in the LM139 Voltage Comparator / J. Liu [et al.] // 2014 10<sup>th</sup> International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. 2014. P. 189–192. <http://dx.doi.org/10.1109/ICRMS.2014.7107167>.
20. Радиационно стойкие компоненты полузаказных аналоговых микросхем / О. В. Дворников [и др.] // Известия вузов. Электроника. 2022. Т. 27, № 3. С. 308–321. <https://doi.org/10.24151/15615405-2022-27-3-308-321>.
21. Схемотехническая модернизация операционных усилителей для увеличения скорости нарастания выходного напряжения / Я. Д. Галкин [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 46–53. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-46-53>.

## References

1. Perez R. (2008) Methods for Spacecraft Avionics Protection Against Space Radiation in the Form of Single-Event Transients. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 50 (3), 455–465. <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2008.927735>.
2. Perez R. (2016) Analysis and Simulations of Space Radiation Induced Single Event Transients. *2016 ESA Workshop on Aerospace EMC*. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/AeroEMC.2016.7504569>.
3. Lovshenko I. Yu., Stempitsky V. R., Shandarovich V. T. (2020) Modeling The Impacts of Heavy Charged Particles on Electrical Characteristics of *n*-MOSFET Device Structure. *Doklady BGUIR*. 18 (7), 55–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-55-62> (in Russian).
4. Wrobel F., Dilillo L., Touboul A. D., Saigné F. (2013) Comparison of the Transient Current Shapes Obtained with the Diffusion Model and the Double Exponential Law – Impact on the SER. *2013 14<sup>th</sup> European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems*. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1109/RADECS.2013.6937441>.
5. Bennett W. G., Schrimpf R. D., Hooten N. C., Reed R. A., Kauppila J. S., Weller R. A., et al. (2012) Efficient Method for Estimating the Characteristics of Radiation-Induced Current Transients. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 59 (6), 2704–2709. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2012.2218830>.
6. Omprakash A. P., Ildefonso A., Fleetwood Z. E., Tzintzarov G. N., Cardoso A. S., Babcock J. A., et al. (2018) The Effects of Temperature on the Single-Event Transient Response of a High-Voltage (>30 V) Complementary SiGe-on-SOI Technology. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 66 (1), 389–396. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2018.2886577>.
7. Lourenco N. E., Ildefonso A., Tzintzarov G. N., Fleetwood Z. E., Motoki K., Paki P., et al. (2017) Single-Event Upset Mitigation in a Complementary SiGe HBT BiCMOS Technology. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 65 (1), 231–238. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2017.2778803>.
8. López-Calle I., Franco F. J., Agapito J. A., Izquierdo J. G. (2011) Load Resistor as a Worst-Case Parameter to Investigate Single-Event Transients in Analog Electronic Devices. *In Proceedings of the 8<sup>th</sup> Spanish Conference on Electron Devices, CDE'2011*. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1109/SCED.2011.5744202>.
9. Cho M. K., Song I., Pavlidis S., Fleetwood Z. E., Buchner S. P., McMorrow D., et al. (2017) An Electrostatic Discharge Protection Circuit Technique for the Mitigation of Single-Event Transients in SiGe BiCMOS Technology. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 65 (1), 426–431. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2017.2778946>.
10. Jung S., Lourenco N. E., Song I., Oakley M. A., England T. D., Arora R., et al. (2014) An Investigation of Single-Event Transients in C-SiGe HBT on SOI Current Mirror Circuits. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 61 (6), 3193–3200. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2014.2358207>.
11. Ding L., Chen W., Wang T., Chen R., Luo Y., Zhang F., et al. (2019) Modeling the Dependence of Single-Event Transients on Strike Location for Circuit-Level Simulation. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 66 (6), 866–874. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2019.2904716>.
12. Seungwoo J., Song I., Fleetwood Z. E., Raghunathan U., Lourenco N. E., Oakley M. A., et al. (2015) The Role of Negative Feedback Effects on Single-Event Transients in SiGe HBT Analog Circuits. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 62 (6), 2599–2605. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2015.2498540>.
13. Jaulent P., Pouget V., Lewis D., Fouillat P. (2007) Study of Single-Event Transients in High-Speed Operational Amplifiers. *2007 9<sup>th</sup> European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems*. 1974–1981. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2008.920265>.
14. Boulghassoul Y., Massengill L. W., Sternberg A. L., Pease R. L., Buchner S., Howard J. W., et al. (2002) Circuit Modeling of the LM124 Operational Amplifier for Analog Single-Event Transient Analysis. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 49 (6), 3090–3096. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2002.805400>.
15. Liu J. (2019) Simulations for Single Event Transient Effects in the LM124 Operational Amplifier. *2019 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems*. 552–555. <http://dx.doi.org/10.1109/ICICAS48597.2019.00121>.
16. Langalia H., Lad S., Lolge M., Rathod S. (2012) Analysis of Two-Stage CMOS Op-Amp for Single-Event Transients. *2012 International Conference on Communication, Information & Computing Technology*. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1109/ICCICT.2012.6398149>.
17. Ildefonso A., Lourenco N. E., Fleetwood Z. E., Wachter M. T., Tzintzarov G. N., Cardoso A. S., et al. (2016) Single-Event Transient Response of Comparator Pre-Amplifiers in a Complementary SiGe Technology. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 64 (1), 89–96. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2016.2619582>.
18. Wang Y., Wang W., Du Y., Cao B. (2013) Modeling and Analysis of Analog Single Event Transients in an Amplifier Circuit. *2013 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics*. 94–97. <http://dx.doi.org/10.1109/ICoOM.2013.6626499>.

19. Liu J., Liu Y., Cheng J., En Y., Zhang T., He Y. (2014) Simulations of Single Event Transient Effects in the LM139 Voltage Comparator. *2014 10<sup>th</sup> International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*. 189–192. <http://dx.doi.org/10.1109/ICRMS.2014.7107167>.
20. Dvornikov O. V., Tchekhovskiy V. A., Prokopenko N. N., Galkin Ya. D., Kunts A. V., Chumakov V. E. (2022) Radiation-Hardened Components of Semi-Custom Analog Microcircuits. *News of Universities. Electronics*. 27 (3), 308–321. <https://doi.org/10.24151/15615405-2022-27-3-308-321> (in Russian).
21. Galkin Ya. D., Dvornikov O. V., Tchekhovskiy V. A., Prokopenko N. N. (2023) Circuit Design Modernization of Operational Amplifiers for Increasing Slew Rate of Output Voltage. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 46–53. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-46-53> (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

**Дворников О. В.**, д-р техн. наук, доц., гл. науч. сотр., ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»

**Чеховский В. А.**, зав. лаб. электронных методов и средств эксперимента, Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета

**Ловшенко И. Ю.**, зав. науч.-исслед. лаб. «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

**Чонг Тхань Нгуен**, асп. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-88-90  
E-mail: [lovshenko@bsuir.by](mailto:lovshenko@bsuir.by)  
Ловшенко Иван Юрьевич

#### Information about the authors

**Dvornikov O. V.**, Dr. of Sci. (Tech.) Associate Professor, Principal Researcher, JSC “Minsk Research Instrument-Making Institute”

**Tchekhovskiy V. A.**, Head of the Electronic Methods and Experiment Means Laboratory, Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University

**Lovshenko I. Yu.**, Head of the Research Laboratory “CAD in Micro- and Nanoelectronics” (R&D Lab. 4.4), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

**Trong Thanh Nguyen**, Postgraduate of Micro- and Nanoelectronics Department, BSUIR

#### 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](mailto:lovshenko@bsuir.by)  
Lovshenko Ivan Yur'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-43-52>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.396.218:614.89.086.5

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА, СОЗДАВАЕМОГО ГРУППИРОВКАМИ СПУТНИКОВ У ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГИСТРАЦИОННЫХ ДАННЫХ

В. И. МОРДАЧЕВ, А. С. СВИСТУНОВ, Д. А. ЦИОНЕНКО

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

*Поступила в редакцию 21.05.2024*

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

**Аннотация.** Разработана методика прогноза средней интенсивности электромагнитного фона, создаваемого вблизи поверхности Земли группировкой спутников связи, с учетом количества спутников в группировке, полной излучаемой мощности спутника, параметров его излучения по основным и боковым лепесткам, высоты орбиты и ограничений по углу места обслуживания наземного оборудования. Приведены результаты анализа зависимости средних уровней электромагнитного фона у земной поверхности от количества спутников в группировке при различных сценариях реализации информационного обслуживания наземных абонентских терминалов, подтверждающие адекватность разработанной методики. Сделан вывод, что ожидаемые уровни электромагнитного фона диапазона СВЧ, создаваемого мегасозвездиями низкоорбитальных спутников связи, на много порядков превышают уровни электромагнитного фона естественного происхождения, что существенно меняет физические характеристики среды обитания.

**Ключевые слова:** низкоорбитальный спутник связи, группировка, электромагнитное излучение, полная излучаемая мощность, главный лепесток, боковые лепестки, электромагнитный фон.

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

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках научного проекта № 23-3172 при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь.

**Для цитирования.** Мордачев, В. И. Прогнозирование уровня электромагнитного фона, создаваемого группировками спутников у земной поверхности, с использованием регистрационных данных / В. И. Мордачев, А. С. Свистунов, Д. А. Ционенко // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 43–52. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-43-52>.

## PREDICTION THE LEVEL OF THE ELECTROMAGNETIC BACKGROUND CREATED BY CONSTELLATIONS OF SATELLITES NEAR THE EARTH'S SURFACE USING REGISTRATION DATA

VLADIMIR I. MORDACHEV, ALIAKSANDR S. SVISTUNOU, DZMITRY A. TSYANENKA

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

*Submitted 21.05.2024*

**Abstract.** A technique has been proposed for predicting the average intensity of electromagnetic background created near the Earth's surface by a constellation of communication satellites, taking into account the number of satellites in the constellation, the satellite total radiated power, parameters of its radiation in the main and side lobes,

the orbit altitude and restrictions on the tilt angle of service of ground-based equipment. The results of the analysis of the dependence of the average electromagnetic background levels at the Earth's surface on the number of satellites in the constellation under various scenarios for the implementation of information services for terrestrial subscriber terminals are presented, confirming the adequacy of the developed approach. It is concluded that the expected levels of electromagnetic background in the microwave range created by megaconstellations of low-orbit communication satellites are many orders of magnitude higher than the levels of electromagnetic background of natural origin, which significantly changes the physical characteristics of the habitat.

**Keywords:** low-earth orbit communication satellite, constellation, electromagnetic radiation, total radiated power, main lobe, side lobes, electromagnetic background.

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

**Gratitude.** The work was carried out within the framework of scientific project No 23-3172 with the financial support of the Ministry of Education of the Republic of Belarus.

**For citation.** Mordachev V. I., Svistunou A. S., Tsyantenka D. A. (2024) Prediction the Level of the Electromagnetic Background Created by Constellations of Satellites Near the Earth's Surface Using Registration Data. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 43–52. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-43-52> (in Russian).

## Введение

Наблюдаемое разветвление в околоземном космическом пространстве весьма многочисленных группировок (мегасозвездий) низкоорбитальных спутников связи (Starlink, OneWeb, Astra, Kuiper, GuoWang и др.) увеличивает на несколько порядков количество низкоорбитальных источников сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного излучения (ЭМИ) в направлении земной поверхности и среднюю наземную территориальную плотность нисходящего трафика спутниковой связи, особенно при интеграции этих систем, обеспечивающих высокие скорости и относительно низкие задержки при передаче информации, с глобальными системами мобильной связи 5G/6G. Это неизбежно приведет к существенному усложнению электромагнитной обстановки (ЭМО) в СВЧ-диапазоне у поверхности Земли, что может вызвать помехи для наземных систем различных радиослужб, использующих полосы частот спутниковых систем связи на вторичной основе, а также возможное обострение проблем электромагнитной безопасности населения и электромагнитной экологии среды обитания [1, 2].

Цель исследований – разработка методики анализа статистических распределений энергетических характеристик ансамблей электромагнитных полей (ЭМП) низкоорбитальных спутников (НОИСЗ) у земной поверхности и прогнозирование соответствующих интегральных уровней наземного электромагнитного фона (ЭМФ) с использованием доступных регистрационных данных о полной излучаемой мощности НОИСЗ – параметре  $TRP$  (total radiated power [3]), параметрах диаграмм направленности их антенн (ДНА) – коэффициенте усиления в главном лепестке (ГЛ) и уровне боковых лепестков (БЛ), высоте орбиты и количестве НОИСЗ в группировке.

## Исходные модели и ограничения

### *Модель электромагнитного излучения низкоорбитальных спутников*

Мегасозвездия НОИСЗ характеризуются послойным размещением подмножеств (отдельных созвездий) спутников в разных орбитальных плоскостях и с различными наклонениями орбит, обеспечивающим их равномерное квазирегулярное расположение над поверхностью Земли [4]. Из наземной точки наблюдения (ТН) распределение  $N$  НОИСЗ по  $n$  сферическим орбитальным оболочкам радиусов  $R_i = H_i + R_E$ ,  $i \in [1, n]$ , по  $N_i$  спутников в оболочке может считаться случайным равномерным по ее площади со средней плотностью  $\rho_i$  [НОИСЗ/м<sup>2</sup>]:

$$N = \sum_{i=1}^n N_i; \quad \rho_i = \frac{N_i}{4\pi(H_i + R_E)^2}, \quad (1)$$

где  $300 \leq H_i \leq 2000$  – высота орбиты  $i$ -го созвездия НОИСЗ, км;  $R_E$  – радиус Земли.

В качестве модели ДНА НОИСЗ в направлении земной поверхности может быть использована следующая двухуровневая модель с коническим лучом ГЛ равной ширины  $\Delta\varphi$  по азимуту  $\alpha$  и зенитному углу  $\beta$ :

$$\left. \begin{aligned} G_{ML} &= \frac{C_P}{(1+C_P)\sin^2(\Delta\varphi/4)}; & G_{SL} &= \frac{1}{(1+C_P)\cos^2(\Delta\varphi/4)}; & G_{SLR} &= \frac{G_{SL}}{G_{ML}} = \frac{\operatorname{tg}^2(\Delta\varphi/4)}{C_P}; \\ C_P &= \frac{P_{ML}}{P_{SL}}, & P_{ML} + P_{SL} &= P_{TRP}; & g_N(\alpha, \beta) &= \begin{cases} 1, & \alpha, \beta \in \Delta\Omega_{ML}; \\ G_{SLR} = \frac{\operatorname{tg}^2(\Delta\varphi/4)}{C_P}, & \alpha, \beta \in \Delta\Omega_{SL} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $G_{ML}$  – коэффициент усиления в ГЛ;  $G_{SL}, G_{SLR}$  – абсолютный и относительный уровни БЛ;  $C_P$  – отношение мощностей, излучаемых по ГЛ ( $P_{ML}$ ) и БЛ ( $P_{SL}$ ) соответственно;  $\Delta\Omega_{ML}, \Delta\Omega_{SL}$  – телесный угол, соответствующий ГЛ и БЛ;  $g_N(\alpha, \beta)$  – нормированная ДНА;  $P_{TRP}$  – TRP.

Поскольку все спутники в созвездии НОИСЗ можно считать одинаковыми, можно считать одинаковыми и их эквивалентные изотропно излучаемые мощности (ЭИИМ) как по ГЛ ( $P_{eML} = G_{ML}P_{TRP}$ ), так и по БЛ ( $P_{eSL} = G_{SL}P_{TRP} = G_{SLR}P_{eML}$ ). На рис. 1 показано направление ГЛ ЭМИ НОИСЗ к земной поверхности при  $\varepsilon = \varepsilon_{\min} + \Delta\varphi/2$  ( $O$  – точка пересечения оси ГЛ с земной поверхностью). Потенциальная зона обслуживания НОИСЗ ограничивается минимальными углами места  $\theta_{\min}$  прихода сигналов на наземный абонентский терминал (АТ). При наклонном положении ГЛ она имеет вид пятна, по форме близкого к эллипсу с осями  $L_X, L_Y$  и площадью  $S_S \approx \pi L_X L_Y$ , наибольшая длина радиолинии НОИСЗ→АТ равна  $R_{\max}$ .

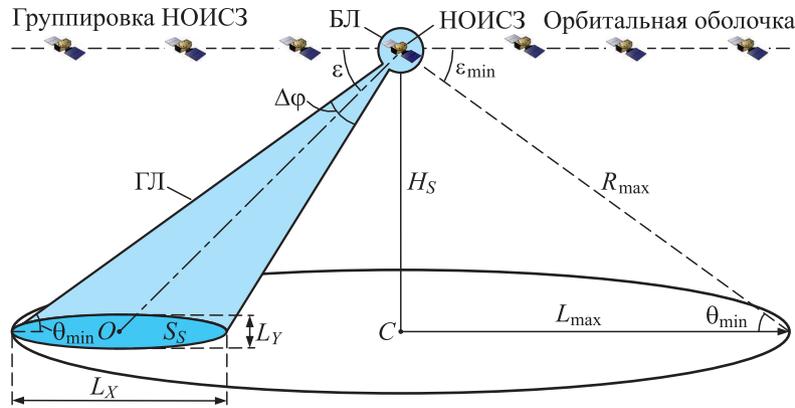


Рис. 1. Направление главного лепестка электромагнитного излучения низкоорбитальных спутников к земной поверхности

Fig. 1. Direction of the main lobe of electromagnetic radiation from low-orbit satellites to the Earth's surface

Модель размещения НОИСЗ на орбитальной оболочке с высотой орбиты  $H_S$  и ТН на земной поверхности с учетом ее сферичности приведена на рис. 2. Сферичность Земли и орбитальных оболочек НОИСЗ определяет различие между минимальным углом места наблюдения НОИСЗ из наземной ТН и минимальным углом визирования данной ТН с этого НОИСЗ:  $\varepsilon_{\min} > \theta_{\min}$ .

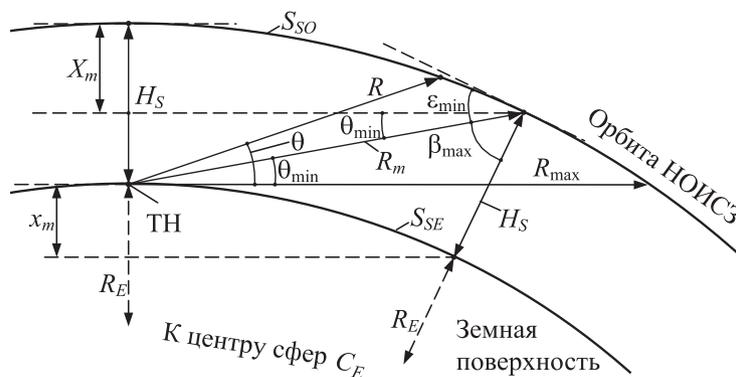


Рис. 2. Модель размещения низкоорбитальных спутников на орбитальной оболочке

Fig. 2. Model of placement of low-orbit satellites on the orbital shell

Связь между углами  $\varepsilon_{\min}$  и  $\theta_{\min}$  определяется следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\min} = \frac{\pi}{2} - \beta_{\max}, \quad \beta_{\max} = \arccos \left( \frac{(H_S + R_E)^2 + R_m^2 - R_E^2}{2(H_S + R_E)R_m} \right); \\ R_m = \sqrt{R_E^2 \sin^2 \theta_{\min} + H_S^2 + 2R_E H_S - R_E \sin \theta_{\min}} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где  $R_m$  – максимальное расстояние между НОИСЗ и ТН при  $90^\circ \geq \theta \geq \theta_{\min}$ ;  $\beta_{\max}$  – максимальный угол между вертикалью (надиром) в точке расположения НОИСЗ и направлением на границу его потенциальной зоны обслуживания, определяемый значением  $\theta_{\min}$ .

НОИСЗ сферического сегмента высотой  $X_m$  и площадью  $S_{SO}$  орбитальной оболочки с высотой орбиты  $H_S$  облучают ТН в диапазоне углов визирования  $\varepsilon \in [\varepsilon_{\min}, 90^\circ]$ . Расстояние  $R_{\max}$  на рис. 2 соответствует горизонту (удаленности НОИСЗ от ТН при  $\theta = 0^\circ$ ).

#### Модель условий распространения радиоволн

Будем полагать, что все анализируемые ТН земной поверхности находятся в прямой видимости от орбитальных позиций НОИСЗ – источников ЭМИ, что позволяет использовать модель условий распространения радиоволн (РРВ) в свободном пространстве

$$Z = \frac{P_e}{4\pi R^2}, \quad (4)$$

где  $Z$  – плотность потока мощности (ППМ) ЭМП, Вт/м<sup>2</sup>, создаваемого в ТН;  $P_e$  – ЭИИМ НОИСЗ – точечного источника ЭМИ;  $R$  – расстояние между ТН и антенной НОИСЗ.

*Интенсивность электромагнитного фона в точке наблюдения, создаваемого электромагнитными излучениями низкоорбитальных спутников*

Интенсивность  $Z_\Sigma$  ЭМФ, создаваемого в ТН множеством  $M$  НОИСЗ, определяется в виде скалярной суммы  $M$  случайных значений ППМ ЭМП, создаваемых в ТН:

$$Z_\Sigma = \sum_{m=1}^M Z_m. \quad (5)$$

#### Алгоритм анализа характеристик электромагнитной обстановки

Технология системного анализа характеристик ЭМО у земной поверхности, создаваемых созвездиями НОИСЗ, основана на методологии [5] и предполагает последовательное выполнение следующих процедур:

а) определение анализируемого сценария ЭМИ созвездия НОИСЗ по отношению к земной поверхности, характеристик соответствующего данному сценарию взаимного пространственного расположения ТН, случайно выбираемой на земной поверхности, и подмножеств НОИСЗ с одинаковой ЭИИМ ( $P_{eML}, P_{eSL}$ ) в направлении на ТН;

б) определение плотности распределения вероятностей (п.р.в.)  $w(R)$  расстояний от НОИСЗ с ЭИИМ  $P_{eML}$  до ТН на земной поверхности;

с) определение п.р.в.  $w(Z_{ML})$  ППМ ЭМП, создаваемых в ТН излучениями НОИСЗ по ГЛ, как п.р.в. случайной величины  $Z$ , функционально преобразованной с использованием зависимости, обратной (4), и  $P_e = P_{eML}$ , а также его матожидания  $m_1(Z_{ML})$ :

$$w(Z_{ML}) = w(R = \Phi^{-1}(Z)) \left| \frac{dR}{dZ} \right|, \quad R = \Phi^{-1}(Z_{ML}) = \left( \frac{P_{eML}}{4\pi Z_{ML}} \right)^{1/2}; \quad m_1(Z_{ML}) = \int_{Z_{ML \min}}^{Z_{ML \max}} Z_{ML} w(Z_{ML}) dZ_{ML}; \quad (6)$$

д) определение средней интенсивности  $Z_{\Sigma ML}$  составляющей ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями НОИСЗ по ГЛ с ЭИИМ  $P_{eML}$ , как произведения среднего числа  $N_{ML}$  этих НОИСЗ, определенного на стадии «а», и среднего значения  $m_1(Z_{ML})$  ППМ ЭМП НОИСЗ в ТН:

$$Z_{\Sigma ML} = N_{ML} m_1(Z_{ML}); \quad (7)$$

е) повторение стадий «б, с, д» для подмножества НОИСЗ, облучающих ТН по БЛ с ЭИИМ  $P_{eSL}$ , с определением средней интенсивности составляющей ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями подмножества НОИСЗ с ЭИИМ  $P_{eSL}$ , как произведения среднего числа этих НОИСЗ и матожидания создаваемой ими ППМ:  $Z_{\Sigma SL} = N_{SL} m_1(Z_{SL})$ ;

г) определение среднего суммарного уровня  $Z_{\Sigma}$  ЭМФ в ТН как суммы компонент, образуемых излучениями данного множества НОИСЗ по ГЛ и БЛ:

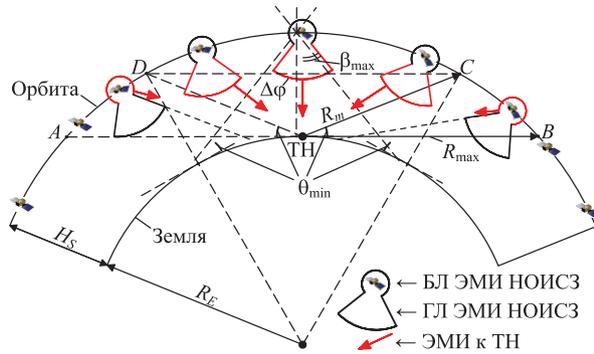
$$Z_{\Sigma} = Z_{\Sigma ML} + Z_{\Sigma SL}. \quad (8)$$

### Анализ базовых сценариев облучения земной поверхности группировками низкоорбитальных спутников

Поскольку различные системы спутниковой связи отличаются характеристиками ЭМИ в направлении земной поверхности, вышеописанный алгоритм использован при анализе характеристик наземного ЭМФ для двух различных сценариев реализации ЭМИ НОИСЗ.

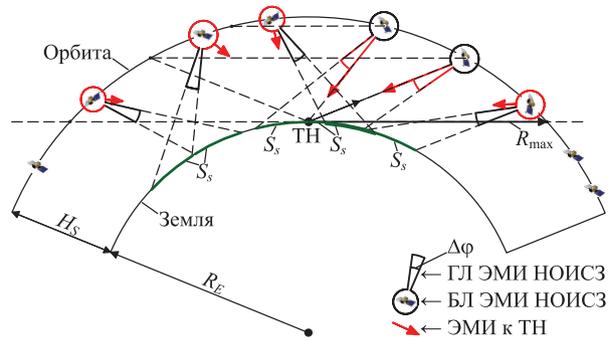
*Сценарий 1. Низкоорбитальные спутники с квазиизотропным электромагнитным излучением в направлении земной поверхности*

Под квазиизотропным ЭМИ НОИСЗ в направлении земной поверхности будем понимать излучение широким ГЛ ДНА, направленным вертикально вниз и охватывающим всю часть земной поверхности, визируемую из точки локализации НОИСЗ, либо значительную ее часть, соответствующую зоне обслуживания НОИСЗ в диапазоне углов места  $[\theta_{\min}, \pi/2]$ . Сценарий пространственного размещения наземной ТН и группировки подобных НОИСЗ, распределенных равномерно с плотностью  $\rho_i = \text{const}$  по  $i$ -й орбитальной оболочке высотой  $H_S$ , приведен на рис. 3, 4. На рис. 3 облучающие ТН части ДНА НОИСЗ выделены цветом.



**Рис. 3.** Модель группировки низкоорбитальных спутников с широкими главными лепестками и ориентированными вертикально вниз электромагнитными излучениями

**Fig. 3.** Model of a constellation of low-orbit satellites with wide main lobes and vertically downward electromagnetic emissions



**Рис. 4.** Модель группировки низкоорбитальных спутников с узкими главными лепестками, разнонаправленными по отношению к точкам наблюдения

**Fig. 4.** Model of a constellation of low-orbit satellites with narrow main lobes, multidirectional with respect to observation points

*Вариант 1.* ГЛ ЭМИ НОИСЗ охватывает всю часть земной поверхности, ограниченной линией горизонта ( $\theta_{\min} = 0^\circ$ ), БЛ ЭМИ НОИСЗ отсутствуют ( $C_p \gg 1$ ), среднее число НОИСЗ в сегменте оболочки, ограниченном зоной радиовидимости радиусом  $R_{\max}$  из ТН, определяется по формуле

$$N_{\Sigma} = 2\pi\rho_i (R_E + H_S) H_S. \quad (9)$$

Используя вышеприведенный алгоритм, получим следующее:

1) п.р.в.  $w(R)$  удаленности НОИСЗ – источника ЭМИ от ТН:

$$w(R) = \frac{R}{H_S R_E}, \quad H_S \leq R \leq \sqrt{2R_E H_S + H_S^2}; \quad (10)$$

2) в рассматриваемом случае ЭМИ НОИСЗ является изотропным лишь для множества ТН на земной поверхности, излучение происходит только в направлении Земли в телесном угле  $\Omega_E = 2\pi(1 - \cos\beta_{\max})$ , соответствующем  $\theta_{\min} = 0^\circ$  и следующему значению  $\beta_{\max}$ :

$$\beta_{\max} = \arccos \frac{(H_S + R_E)^2 + R_{\max}^2 - R_E^2}{2(H_S + R_E)R_{\max}}, \quad R_{\max} = \sqrt{H_S^2 + 2R_E H_S}. \quad (11)$$

Поэтому при фиксированной  $TRP$   $P_{TRP}$  ЭИИМ НОИСЗ в направлении земной поверхности увеличится на величину  $K_P$ , равную  $4\pi/\Omega_E$ :  $P_e = 4\pi P_{TRP}/\Omega_E$ :

$$P_e = \frac{4\pi P_{TRP}}{\Omega_E}; \quad K_P = \frac{2(H_S + R_E)}{H_S + R_E - \sqrt{H_S^2 + 2R_E H_S}}, \quad \Omega_E = 2\pi \left( 1 - \frac{\sqrt{H_S^2 + 2R_E H_S}}{H_S + R_E} \right). \quad (12)$$

Случай  $K_P = 1$  соответствует гипотетическому случаю с изотропными ЭМИ НОИСЗ;

3) п.р.в.  $w(Z)$  ППМ, создаваемой НОИСЗ с ЭИИМ  $P_e$  в ТН:

$$w(Z) = \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{(Z_{\max} - Z_{\min}) Z^2}, \quad Z_{\min} < Z < Z_{\max}, \quad Z_{\min} = \frac{P_e}{4\pi H_S (2R_E + H_S)}, \quad Z_{\max} = \frac{P_e}{4\pi H_S^2}; \quad (13)$$

4) матожидание  $m_1(Z)$  определяется следующим соотношением:

$$m_1(Z) = \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} Z w(Z) dZ = \frac{Z_{\min} Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}} = \frac{P_e}{8\pi H_S R_E} \ln \frac{2R_E + H_S}{H_S}; \quad (14)$$

5) среднее значение  $Z_\Sigma$  интенсивности ЭМФ в ТН, определяемое по формуле:

$$Z_\Sigma = N_\Sigma m_1(Z) = \frac{\rho_i P_e (R_E + H_S)}{4R_E} \ln \frac{2R_E + H_S}{H_S}. \quad (15)$$

*Вариант 2.* Излучения НОИСЗ широкими ГЛ ДНА, направленными вертикально вниз, охватывают значительную часть земной поверхности, визируемой из точки локализации НОИСЗ, ограниченную диапазоном углов места  $[\theta_{\min}, \pi/2]$ . В данном случае имеет место следующее:

1) ЭМИ НОИСЗ не являются изотропными, их антенны с диаграммой направленности (2) ориентированы вертикально вниз и обеспечивают обслуживание в диапазоне  $\theta \in [\theta_{\min}, 90^\circ]$  в силу конической формы ГЛ шириной  $\Delta\varphi$ , равной удвоенному значению максимального угла визирования ТН:  $\Delta\varphi = 2\beta_{\max}$ . Ширина  $\Delta\varphi$  ГЛ ЭМИ НОИСЗ оказывается связанной с  $\theta_{\min}$  и  $H_S$  НОИСЗ, определяющими значение  $\beta_{\max}$  визирования ТН в точке орбиты, наблюдаемой из ТН под углом  $\theta_{\min}$ ;

2) ЭИИМ НОИСЗ в ГЛ ( $P_{eML} = P_{TRP} G_{ML}$ ) и БЛ ( $P_{eSL} = P_{TRP} G_{SL}$ ) будут определяться величиной  $P_{TRP}$  и коэффициентами усиления (2) антенны в ГЛ и БЛ;

3) область локализации НОИСЗ на орбитальной оболочке, облучающих ТН главными лепестками, представляет собой шаровой сегмент высотой  $X_m$  (рис. 2), определяемый величиной  $R_m$  (3) и диаметром основания  $DC$  на рис. 3; п.р.в. их удаленности от ТН имеет вид

$$w(R) = \frac{2R}{R_m^2 - H_S^2}, \quad H_S \leq R \leq R_m; \quad (16)$$

4) область локализации НОИСЗ на орбитальной оболочке, облучающих ТН боковыми лепестками, представляет собой шаровой пояс  $ABCD$  на рис. 3; п.р.в. их удаленности от ТН сохраняет вид (16) при  $R_m \leq R \leq R_{\max}$ .

В варианте 2 средняя суммарная интенсивность ЭМФ  $Z_\Sigma$  равна сумме (8) значений средней интенсивности ЭМФ, создаваемых в ТН излучениями НОИСЗ по главным ( $Z_{\Sigma ML}$ ) и боковым ( $Z_{\Sigma SL}$ ) лепесткам, и определяемых соотношениями:

$$Z_{\Sigma ML} = \frac{\rho P_{TRP} G_{ML} (R_E + H_S) (H_S - R_m \sin \theta_{\min})}{R_m^2 - H_S^2} \ln \frac{R_m}{H_S}; \quad (17)$$

$$Z_{\Sigma SL} = \frac{P_{TRP} G_{ML} \rho (R_E + H_S) R_m \sin \theta_{\min} \operatorname{tg}^2(\Delta\varphi/4)}{C_P (R_{\max}^2 - R_m^2)} \ln \frac{R_{\max}}{R_m}. \quad (18)$$

*Сценарий 2. Низкоорбитальные спутники с узконаправленным электромагнитным излучением в направлении земной поверхности*

Этот сценарий (рис. 4) в наибольшей степени адекватен применительно к анализу созвездий НОИСЗ в системе Starlink, ширина лучей  $\Delta\varphi$  в которой составляет  $3,5^\circ - 5,5^\circ$  в зависимости от угла наклона, а множество значений наклона орбит для множества орбитальных плоскостей позволяет в первом приближении считать азимут ГЛ отдельного НОИСЗ в зоне радиовидимос-

ти из ТН равновероятным случайным при его относительно небольшом постоянном угле места  $\theta_{\min}$ , обеспечивающем требуемую величину зоны обслуживания наземного АТ по направлению движения НОИСЗ. В силу указанных отличий данного сценария от рассмотренных ранее при его анализе использован иной подход, основанный на усреднении по земной поверхности суммы ППМ ЭМП, излучаемых по ГЛ, а также вероятностный подход, основанный на представлении облучения наземной ТН по ГЛ единичного НОИСЗ как редкого события и определения среднего уровня ЭМФ в ТН с использованием пуассоновской вероятностной модели.

Площадь  $S_S$  «пятна» на земной поверхности (рис. 1), облучаемого узким коническим лучом НОИСЗ шириной  $\Delta\varphi$ , определяется по формуле:

$$S_S \approx \frac{\pi L_X L_Y}{4}, \quad L_X = \frac{H_S [\operatorname{tg}(\varepsilon + \Delta\varphi/2) - \operatorname{tg}(\varepsilon - \Delta\varphi/2)]}{\operatorname{tg}(\varepsilon + \Delta\varphi/2) \operatorname{tg}(\varepsilon - \Delta\varphi/2)}, \quad L_Y \approx \frac{2H_S \operatorname{tg}(\Delta\varphi/2)}{\sin(\varepsilon)}. \quad (19)$$

Средняя относительная площадь  $S_{RA}$  облучения земной поверхности созвездием НОИСЗ, имеющей  $N_\Sigma$  спутников в орбитальной оболочке высотой  $H_S$ , запишется в виде:

$$S_{RA} = \frac{N_\Sigma S_S}{S_E} \approx \frac{\pi L_X L_Y N_\Sigma}{4S_E}, \quad S_E = 4\pi R_E^2. \quad (20)$$

Оценки с использованием (20), в частности, позволяют сделать вывод, что при завершении базовой стадии создания системы Starlink ( $N_\Sigma \approx 30\,000$  на 10–15 орбитальных оболочках с высотами в пределах 340–640 км) сценарий, предполагающий наклонное положение ГЛ с  $\theta_{\min} = 25^\circ$ , обеспечивает практически полное «однослойное» покрытие всей земной поверхности, при котором любая точка на поверхности в каждый момент времени находится в зоне обслуживания хотя бы одного из НОИСЗ. Поскольку  $S_{RA}$  может интерпретироваться как среднее число ГЛ НОИСЗ, облучающих ТН в произвольный момент, можно полагать, что вероятность  $p(k)$  ее облучения в этот момент конкретным числом  $k$  НОИСЗ определяется распределением Пуассона:

$$p(k) = \frac{S_{RA}^k}{k!} \exp(-S_{RA}). \quad (21)$$

Средняя ППМ  $Z_a$ , создаваемая в «пятне» ГЛ НОИСЗ на земной поверхности, запишется в виде:

$$Z_a \approx \frac{C_P P_{TRP} \sin^2 \varepsilon}{4\pi H_S^2 (1 + C_P) \sin^2(\Delta\varphi/4)}. \quad (22)$$

При дискретном распределении (21) вероятностей попадания ТН в зону обслуживания ровно  $k$  ГЛ НОИСЗ средняя интенсивность создаваемого ими ЭМФ в этой ТН определяется следующим образом:

$$Z_{\Sigma ML} = \sum_{k=1}^{K_m} k Z_a p(k), \quad K_m \rightarrow N_{\Sigma L}. \quad (23)$$

Очевидно, что адекватность пуассоновской модели применительно к рассматриваемому случаю ограничена, поскольку взаимное расположение ТН и НОИСЗ нельзя считать совершенно случайным, так как взаимное расположение НОИСЗ в орбитальной оболочке обладает регулярностью, необходимой для обеспечения адекватных времени ожидания и минимальной вероятности отказа обслуживания АТ. Принимая это во внимание, но учитывая наличие в мегасозвездии НОИСЗ многих орбитальных оболочек, взаимное расположение НОИСЗ которых можно считать случайным, а также независимость мегасозвездий НОИСЗ, достаточно, как правило, ограничиться рассмотрением модели (21) для  $k \leq 10$ .

Количество  $N_{SL}$  НОИСЗ, облучающих земную поверхность по БЛ, определяется числом НОИСЗ в зоне радиовидимости из ТН и соотношением  $\Omega_{ML}$  соответствующего ГЛ, и  $\Omega_H$ , стягиваемого земной поверхностью по линии горизонта и соответствующего углу  $\beta_{\max}$  (11) при  $\theta_{\min} = 0^\circ$ :

$$N_{\Sigma SL} = \frac{N_\Sigma (\Omega_H - \Omega_{ML})}{\Omega_H}, \quad \Omega_H = 2\pi \left( 1 - \frac{\sqrt{H_S^2 + 2R_E H_S}}{H_S + R_E} \right), \quad \Omega_{ML} = 2\pi \left( 1 - \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right). \quad (24)$$

Излучения НОИСЗ в направлении земной поверхности по БЛ можно считать изотропными в телесном угле величиной  $\Omega_H - \Omega_{ML}$ , поэтому для определения средней интенсивности  $Z_{\Sigma SL}$  ЭМФ, создаваемого этими излучениями у земной поверхности, можно использовать соотношения (14), (15) для ЭМИ изотропных НОИСЗ (сценарий 1) подстановкой в них значений  $P_e = P_{eSL}$  ЭИИМ по БЛ:

$$P_{eSL} = \frac{P_{TRP}}{(1 + C_P) \cos^2(\Delta\phi/4)}, \quad Z_{\Sigma SL} = \frac{N_{\Sigma SL} P_{eSL} \ln(R_{\max}/H_S)}{2\pi(R_{\max}^2 - H_S^2)}. \quad (25)$$

Средний суммарный уровень ЭМФ  $Z_{\Sigma}$  определяется аналогично (8) как сумма (23) и (25).

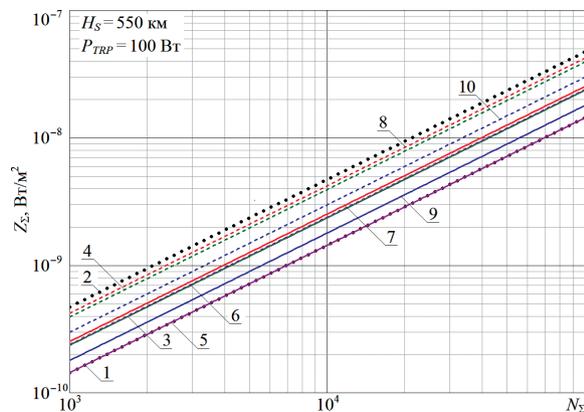
### Количественный анализ средней интенсивности электромагнитного фона для сценариев 1, 2

На рис. 5 в качестве примера приведены следующие расчетные зависимости средней интенсивности ЭМФ, создаваемого ЭМИ по ГЛ созвездия НОИСЗ у земной поверхности, от количества НОИСЗ в системе при  $P_{TRP} = 100$  Вт,  $H_S = 550$  км:

- точечная коричневая линия 1 соответствует гипотетическому случаю с изотропными ЭМИ НОИСЗ при варианте 1 сценария 1 (рис. 3, соотношение (15) при  $K_P = 1, P_e = P_{YRP}$ );
- точечная черная линия 2 соответствует варианту 2 сценария 1 при  $\theta_{\min} = 0^\circ, C_P \gg 1$  (рис. 3, соотношение (15));
- сплошная зеленая линия 3 соответствует  $Z_{\Sigma ML}$  для варианта 2 сценария 1 (рис. 3, соотношение (17)) при  $\theta_{\min} = 0^\circ, C_P = 1$ ; пунктирная зеленая линия 4 –  $Z_{\Sigma ML}$  для этого варианта сценария 1 при  $\theta_{\min} = 0^\circ, C_P = 5$ ;
- линии 5–10 соответствуют  $Z_{\Sigma ML}$  при сценарии 2 (рис. 4, соотношение (23)): сплошная розовая линия 5, совпадающая с линией 1, соответствует  $\theta_{\min} = 25^\circ, C_P = 1$ ; пунктирная розовая линия 6, совпадающая с линией 3, соответствует  $\theta_{\min} = 25^\circ, C_P = 5$ ; сплошная красная линия 7 соответствует  $\Delta\phi = 3,5^\circ, \theta_{\min} = 0^\circ, K_m = 50, C_P = 1$ ; пунктирная красная линия 8 соответствует  $\Delta\phi = 3,5^\circ, \theta_{\min} = 0^\circ, K_m = 50, C_P = 5$ ; сплошная синяя линия 9 соответствует  $\Delta\phi = 5,5^\circ, \theta_{\min} = 25^\circ, K_m = 50, C_P = 1$ ; пунктирная синяя линия 10 соответствует  $\Delta\phi = 5,5^\circ, \theta_{\min} = 25^\circ, K_m = 50, C_P = 5$ .

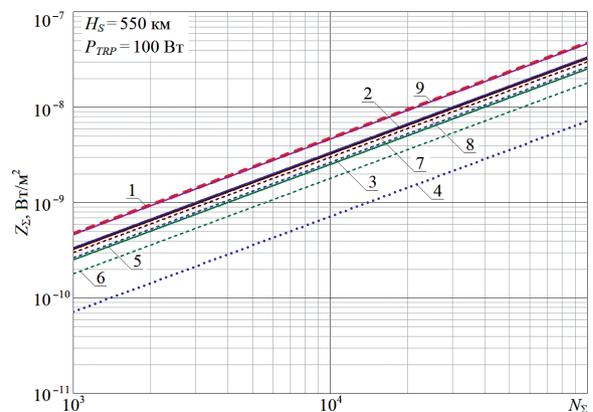
На рис. 6 в качестве примера для сценария 2 (рис. 4) приведены расчетные зависимости  $Z_{\Sigma}(N_{\Sigma})$  средней интенсивности ЭМФ и его компонент  $Z_{\Sigma ML}(N_{\Sigma})$  и  $Z_{\Sigma SL}(N_{\Sigma})$  от количества НОИСЗ  $N_{\Sigma}$  в системе для  $K_m = 50$  и типовых параметров НОИСЗ EMR при различных  $\theta_{\min}, \Delta\phi$  и  $C_P$ ; здесь же приведена расчетная пессимистическая зависимость (15) для сценария 2:

- точечная красная линия 1 соответствует пессимистической оценке интенсивности ЭМФ (соотношение (15), вся энергия, излучаемая НОИСЗ, попадает на земную поверхность);



**Рис. 5.** Зависимость среднего уровня электромагнитного фона от количества низкоорбитальных спутников при различных сценариях функционирования спутниковой системы связи

**Fig. 5.** Dependence of the average level of electromagnetic background on the number of low-orbit satellites under various scenarios of operation of the satellite communication system



**Рис. 6.** Зависимость среднего уровня электромагнитного фона и его компонент от количества низкоорбитальных спутников при различных  $C_P, \theta_{\min}$  и  $\Delta\phi$  (сценарий 2)

**Fig. 6.** Dependence of the average electromagnetic background level and its components on the number of low-orbit satellites at different  $C_P, \theta_{\min}$  and  $\Delta\phi$  (scenario 2)

– линии 2, 3 и 4 соответствуют  $\theta_{\min} = 0^\circ$ ,  $\Delta\varphi = 10^\circ$ ,  $C_p = 1$  – сплошная синяя линия 2 соответствует зависимости  $Z_\Sigma(N_\Sigma)$ , пунктирная синяя линия 3 – зависимости  $Z_{\Sigma ML}(N_\Sigma)$  средней интенсивности (23) ЭМФ, создаваемой ЭМИ ГЛ; точечная синяя линия 4 – зависимости  $Z_{\Sigma SL}(N_\Sigma)$  средней интенсивности (25) ЭМФ, создаваемой ЭМИ БЛ;

– линии 5 и 6 соответствуют  $\theta_{\min} = 25^\circ$ ,  $\Delta\varphi = 5,5^\circ$ ,  $C_p = 1$  – сплошная зеленая линия 5 соответствует зависимости  $Z_\Sigma(N_\Sigma)$  суммарной средней интенсивности ЭМФ, пунктирная зеленая линия 6 – зависимости  $Z_{\Sigma ML}(N_\Sigma)$  средней интенсивности ЭМФ, создаваемой ЭМИ ГЛ; для этих параметров расчетная зависимость  $Z_{\Sigma SL}(N_\Sigma)$  совпадает с линией 4;

– линии 7 и 8 соответствуют  $\theta_{\min} = 25^\circ$ ,  $\Delta\varphi = 5,5^\circ$ ,  $C_p = 5$  – сплошная коричневая линия 7 соответствует зависимости  $Z_\Sigma(N_\Sigma)$  суммарной средней интенсивности ЭМФ, пунктирная коричневая линия 8 – зависимости  $Z_{\Sigma ML}(N_\Sigma)$  средней интенсивности ЭМФ, создаваемой ЭМИ ГЛ; составляющая  $Z_{\Sigma SL}(N_\Sigma)$  практически отсутствует;

– сплошная розовая линия 9 соответствует зависимости  $Z_\Sigma(N_\Sigma)$  суммарной средней интенсивности ЭМФ при  $\theta_{\min} = 0^\circ$ ,  $\Delta\varphi = 10^\circ$ ,  $C_p = 5$ .

Анализ графиков, а также детальный количественный анализ рассмотренных сценариев с использованием (9)–(25) свидетельствуют о следующем.

1. Уровень ЭМФ у земной поверхности существенно зависит от параметра  $C_p$ , характеризующего потери мощности ЭМИ на ЭМИ БЛ. С ростом  $C_p$  и уменьшением  $\theta_{\min}$  зависимости  $Z_\Sigma(N_\Sigma)$  приближаются к пессимистической, характерной для сценария 1 (соотношение (15)). В то же время для  $C_p \leq 1$ , соответствующих сканирующим антенным решеткам [6], БЛ ЭМИ НОИСЗ могут вносить заметный вклад в уровень ЭМФ.

2. В варианте 2 сценария 1 и в сценарии 2 при фиксированной  $P_{TRP}$  и исключении попадания ГЛ за пределы земной поверхности ( $\theta_{\min} - \Delta\varphi/2 > 0$ ) изменение ширины ГЛ сопровождается соответствующим изменением усиления  $G_{ML}$  в ГЛ при практическом постоянстве доли  $P_{TRP}$ , излучаемой в телесном угле  $\Omega_H$  (24). Поэтому при заданных  $N_\Sigma$ ,  $\theta_{\min}$ ,  $P_{TRP}$  и  $C_p$  средняя интенсивность ЭМФ у земной поверхности практически не зависит от ширины  $\Delta\varphi$  ГЛ и слабо зависит от высоты  $H_S$  орбиты НОИСЗ. При многолучевом ЭМИ НОИСЗ рост числа лучей сопровождается уменьшением мощности излучения по каждому лучу таким образом, что полная излучаемая мощность  $P_{TRP}$  остается постоянной, ограничиваемой энергетическими возможностями НОИСЗ, что можно интерпретировать как расширение эквивалентного единственного ГЛ, при принятых ограничениях не влияющее на среднюю интенсивность создаваемого ЭМФ.

3. Пессимистические оценки средних уровней ЭМФ, создаваемых созвездиями НОИСЗ (оценки наихудшего случая), могут выполняться с использованием (15), а более детальный анализ с применением (17), (18), (23), (25) позволяет оценить влияние на интенсивность ЭМФ энергетической эффективности и направленности ЭМИ НОИСЗ (параметров  $C_p$ ,  $\Delta\varphi$ ), ограничений на угол места  $\theta_{\min}$  обслуживающего НОИСЗ, высот орбит  $H_S$  и др.

## Заключение

1. Сопоставление среднего уровня естественного электромагнитного фона в полосах частот диапазона SHF, выделяемых мегасозвездиями низкоорбитальных спутников (Starlink, OneWeb и т. п.), по данным [7] равного примерно  $10^{-20}$ – $10^{-19}$  Вт/м<sup>2</sup>, со средним уровнем искусственного электромагнитного фона, создаваемого этими системами, свидетельствует о том, что последний может превышать уровень естественного электромагнитного фона на многие порядки. И хотя в целом уровни искусственного электромагнитного фона остаются достаточно низкими, столь значительное в количественном отношении изменение физических характеристик среды функционирования наземных технических систем и среды обитания населения требует весьма серьезного внимания и анализа.

2. Соотношения (9)–(18), (23), (25), полученные в результате анализа нескольких сценариев функционирования созвездий низкоорбитальных спутников, обеспечивают возможность предварительного многовариантного пессимистического количественного анализа средней интенсивности создаваемого ими электромагнитного фона у земной поверхности. Результаты, получаемые с использованием вероятностных схем (7), (21)–(23), дают практически совпадающие результаты, что может считаться свидетельством корректности этих различающихся подходов и методик анализа интенсивности электромагнитного фона.

### Список литературы / References

1. Martel J. (2023) Did Low Earth Orbit Internet Satellites Trigger the COVID-19 Pandemic? *NEXUS*. 30 (3), 35–43, 82–83.
2. Furstenberg A. (2020) *The Invisible Rainbow*. Chelsea Green Publishing.
3. *CEPT Report 67*. July 6, 2018. P. 17.
4. Pehterev S., Makarenko S., Kovalsky A. (2022) Descriptive Model of Starlink Satellite Communication System. *Systems of Control, Communication and Security*. (4), 190–255. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255 (in Russian).
5. Mordachev V. (2009) *System Ecology of Cellular Communications*. Minsk, Belarusian State University Publ. (in Russian).
6. Mordachev V., Tsyantenka D. (2022) Influence of Spatial Selectivity of Radiation of Base Stations on the Level of Electromagnetic Background Created by Mobile Communications. *Doklady BGUIR*. 20 (7), 56–64 (in Russian).
7. Bandara P., Carpenter D. O. (2018) Planetary Electromagnetic Pollution: It is Time to Assess Its Impact. *The Lancet Planetary Health*. (2), e512–e514. DOI: 10.1016/s2542-5196(18)30221-3.

### Вклад авторов

Мордачев В. И. осуществил постановку задачи, разработал методику анализа, выполнил расчеты, построение графиков и анализ полученных результатов, подготовил рукопись статьи.

Свистунов А. С. принял участие в обсуждении исходных данных, методики анализа и полученных результатов.

Ционенко Д. А. принял участие в обосновании исходных данных и анализируемых сценариев формирования электромагнитной обстановки, а также в обсуждении методики анализа и полученных результатов.

### Authors' contribution

Mordachev V. I. stated the research problem, developed the analysis technique, performed calculations and graphic materials and analysis of the results obtained, prepared the manuscript of the article.

Svistunou A. S. took part in the discussion of the initial data, analysis technique and the results obtained.

Tsyantenka D. A. took part in the substantiation of the initial data and analyzed scenarios for the formation of the electromagnetic environment, as well as in the discussion of the analysis methodology and the results obtained.

### Сведения об авторах

**Мордачев В. И.**, канд. техн. наук, доц., зав. науч.-исслед. лаб. «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» (НИЛ 1.7), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

**Свистунов А. С.**, науч. сотр. НИЛ 1.7, БГУИР

**Ционенко Д. А.**, канд. физ.-мат. наук, доц., ст. науч. сотр. НИЛ 1.7, БГУИР

### 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  
Мордачев Владимир Иванович

### Information about the authors

**Mordachev V. I.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Research Laboratory “Electromagnetic Compatibility of Radio-Electronic Equipment” (Lab. 1.7), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

**Svistunou A. S.**, Researcher at the Lab. 1.7., BSUIR

**Tsyantenka D. A.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Senior Researcher at the Lab. 1.7, BSUIR

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-84-38  
E-mail: mordachev@bsuir.by  
Mordachev Vladimir Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-53-61>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.396.96

## СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ВИНТОВ В ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ ПО РАДИОЛОКАЦИОННОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ, ПОЛУЧЕННОМУ ПУТЕМ ОБРАЩЕННОГО СИНТЕЗА АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ

С. Р. ГЕЙСТЕР, В. В. КИРИЧЕНКО

ОАО «АЛЕВКУРП» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 21.05.2024

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

**Аннотация.** Технология обращенного синтеза апертуры антенны, использованная для построения радиолокационного изображения винтов летательного аппарата, показала высокую эффективность. Радиолокационное изображение позволяет визуализировать лопасти винтов, входящих в функциональную группу (тянущие винты самолета, несущие винты двухвинтового вертолета, несущие винты мультикоптера). При наличии одного винта в летательном аппарате (тянущий винт самолета, несущий винт одновинтового вертолета) радиолокационное изображение является простым и ясно воспринимаемым. В случае нескольких винтов, принадлежащих к одной функциональной группе, анализ радиолокационного изображения существенно усложняется. Это обусловлено случайным взаимным положением лопастей разных винтов в момент начала построения изображения, а также возможным случайным совпадением пространственного положения лопастей, принадлежащих к разным винтам. В связи с этим определение количества винтов в летательном аппарате является новой актуальной задачей, решение которой позволяет получить дополнительную информацию для распознавания. В основу рассматриваемого способа определения количества винтов положены наиболее распространенные конструктивные особенности – лопасти в винте следуют с одинаковым угловым интервалом, в винтах функциональной группы число лопастей одинаковое.

**Ключевые слова:** радиолокационное изображение, обращенный синтез апертуры антенны, винты летательного аппарата.

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

**Для цитирования.** Гейстер, С. Р. Способ определения количества винтов в летательном аппарате по радиолокационному изображению, полученному путем обращенного синтеза апертуры антенны / С. Р. Гейстер, В. В. Кириченко // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 53–61. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-53-61>.

## METHOD FOR DETERMINING THE NUMBER OF PROPELLERS IN AN AIRCRAFT FROM A RADAR IMAGE OBTAINED BY INVERSE SYNTHESIS OF THE ANTENNA APERTURE

SERGEY R. HEISTER, VALERY V. KIRYCHENKA

JSC "ALEVKURP" (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 21.05.2024

**Abstract.** The inverse antenna aperture synthesis technology used to construct a radar image of an aircraft's propellers has shown high efficiency. The radar image allows to visualize the blades of the rotors included in the functional group (traction rotors of an aircraft, rotors of a twin-rotor helicopter, rotors of a multicopter). In the case of a single rotor in an aircraft (an airplane's tractor rotor, a single-rotor helicopter's main rotor), the radar image is simple and clearly perceptible. In the case of several propellers belonging to the same functional group, the analysis of the radar image becomes significantly more complicated. This is due to the random relative position of the blades of different propellers at the moment the image begins to be constructed, as well as the possible random coincidence of the spatial position of the blades belonging to different propellers. In this regard, determining the number of propellers in an aircraft is a new urgent task, the solution of which allows us to obtain additional information for recognition. The method under consideration for determining the number of propellers is based on the most common design features – the blades in the propeller follow at the same angular interval, in the propellers of the functional group the number of blades is the same.

**Keywords:** radar image, inverse antenna aperture synthesis, aircraft propellers.

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

**For citation.** Heister S. R., Kirychenka V. V. (2024) Method for Determining the Number of Propellers in an Aircraft from a Radar Image Obtained by Inverse Synthesis of the Antenna Aperture. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 53–61. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-53-61> (in Russian).

### Введение

Исследования по разработке радиолокационных способов и устройств, обеспечивающих получение информации о классе (типе) наблюдаемого объекта, начались во второй половине XX века. Примеры таких исследований приведены в [1–4].

Подход к построению радиолокационного изображения (РЛИ) периодической в пространстве и вращающейся относительно центра симметрии системы отражателей в конструкции объекта, основанный на обращенном синтезе апертуры антенны, был разработан в приложении к радиолокационному наблюдению колесно-гусеничной техники [5, 6]. Затем этот подход применялся при построении РЛИ винтов летательных аппаратов (ЛА) [7–9]. В основе подхода лежат многоканальная корреляционная обработка принятого сигнала, включающая компенсацию междупериодного сдвига фазы сигнала, отраженного от вращающейся лопасти в составе винта, и последующее когерентное накопление. Опорный сигнал для корреляционной обработки формируется как сигнал, «отраженный» от виртуальной лопасти [7].

Радиолокационное изображение винтов ЛА может быть использовано для решения следующих задач:

- распознавание класса (типа) наблюдаемого ЛА;
- селекция (выделение) отметок ЛА определенного класса из совокупности, включающей отметки движущихся наземных объектов различных классов. Примером является селекция винтовых малоскоростных беспилотных летательных аппаратов на фоне отметок движущихся наземных объектов (автомобили, гусеничные машины, мотоциклы, велосипеды).

РЛИ винтов ЛА представляет собой совокупность комплексных амплитуд сигналов, полученных в элементах анализа по углу в плоскости вращения винта: в вертикальной – изображение тянущих винтов самолетов и рулевых винтов одновинтовых вертолетов, в горизонтальной – изображение несущих винтов вертолетов, квадрокоптеров, автожиров. Если ЛА имеет один винт (например, тянущий винт самолета или несущий винт одновинтового вертолета, отражения от которого существенно преобладают над отражениями от рулевого винта), то РЛИ является простым – представляет собой регулярную структуру [9]. Если же ЛА имеет несколько одинаково-

вых винтов (многовинтовой самолет, двухвинтовой вертолет, мультикоптер), то РЛИ существенно усложняется. Это обусловлено двумя основными факторами:

- типичным случайным взаимным расположением системы лопастей разных винтов в момент начала построения РЛИ;
- возможным случайным совпадением пространственного положения лопастей, принадлежащих к разным винтам, которое приводит или к увеличению суммарной комплексной амплитуды в соответствующем элементе РЛИ (синфазное сложение сигналов, отраженных от этих лопастей), или к существенному уменьшению этой амплитуды (противофазное сложение).

Важной информацией, упрощающей анализ РЛИ винтов и повышающей возможности распознавания (селекции) ЛА, является информация о количестве винтов. Она может быть получена на основе поиска в РЛИ регулярных структур, которые формируются в РЛИ каждым винтом отдельно, а их регулярность обусловлена тем, что лопасти в типовом винте (за исключением рулевых винтов по схеме «ножницы») следуют с одинаковым угловым интервалом:

$$\theta_{LN} = \frac{360^\circ}{N_L},$$

где  $N_L$  – число лопастей в винте.

### Радиолокационные изображения винтов летательного аппарата

Невозможно точно предсказать ширину лопасти для наблюдаемого ЛА, поэтому когерентную обработку при построении РЛИ можно выполнить только отдельно для приближающихся и удаляющихся кромок лопастей винта [7, 9]. Для построения РЛИ приближающихся кромок винтов необходимо выделить отраженные от них сигналы, что обеспечивается на основе обработки спектра принятого сигнала.

Далее для пояснений используются иллюстративные примеры, которые получены путем моделирования для следующих параметров зондирующего сигнала: частота повторения  $F_r = 100$  кГц, длина волны  $\lambda = 0,03$  м. Размерности функций на рисунках в статье приведены в относительных единицах, значения которых в данном рассмотрении неинформативны.

На рис. 1 представлена межпериодная временная структура реальной части принятого сигнала  $u_{Rc}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , где  $n$  – номер периода зондирования, а число анализируемых периодов  $N = 10^5$ . Сигнал получен на выходе устройства внутрипериодной обработки путем межпериодного стробирования в элементе разрешения по дальности, в котором находится приближающийся вертолет Ми-8. Принятый сигнал содержит шумовую помеху и отраженный сигнал. На временной диаграмме видны сигналы, отраженные от лопастей несущего винта вертолета.

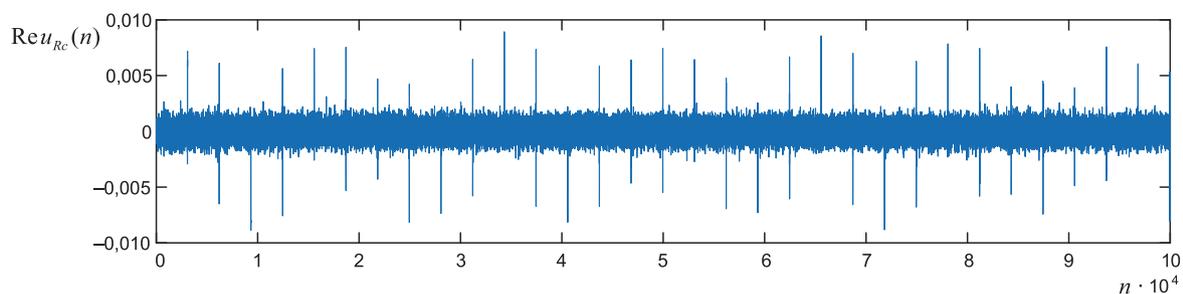
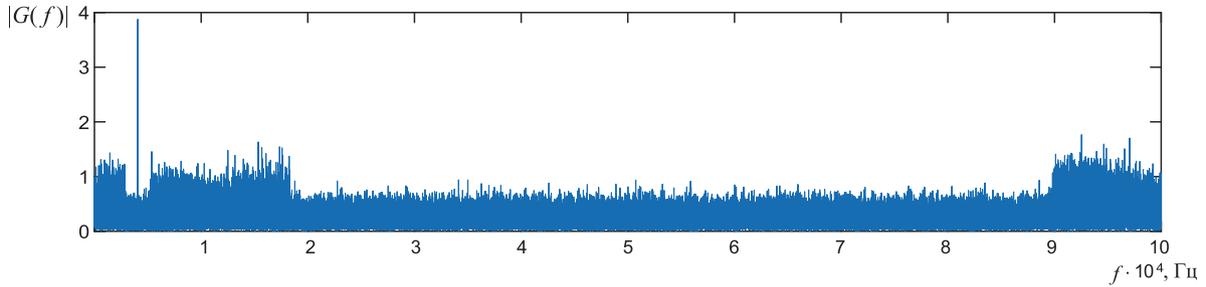


Рис. 1. Реальная часть принятого сигнала  $\text{Re} u_{Rc}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$

Fig. 1. Real part of the received signal  $\text{Re} u_{Rc}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$

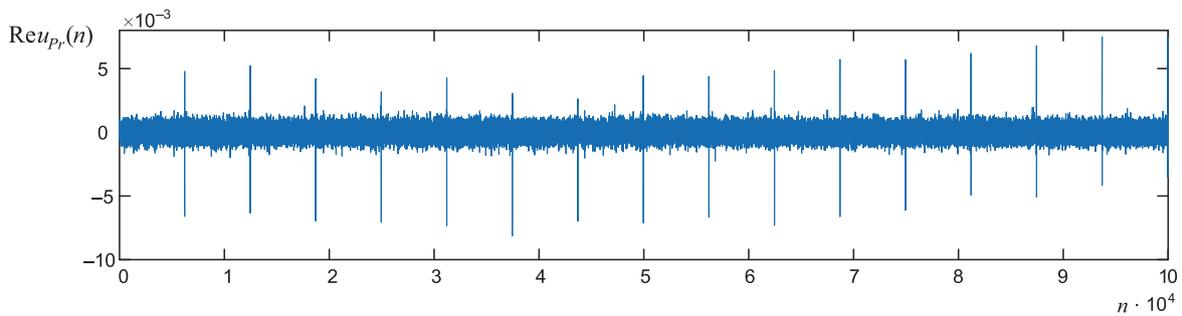
На рис. 2 показан амплитудно-частотный спектр  $|G(f)|$  принятого сигнала  $u_{Rc}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , в котором имеются:

- спектральная составляющая сигнала, отраженного от корпуса ЛА (наибольшая составляющая);
- спектральные составляющие сигналов, отраженных от приближающихся кромок лопастей (справа от спектральной составляющей корпуса);
- спектральные составляющие сигналов, отраженных от удаляющихся кромок лопастей (слева от спектральной составляющей корпуса).



**Рис. 2.** Амплитудно-частотный спектр принятого сигнала  
**Fig. 2.** Amplitude-frequency spectrum of the received signal

На рис. 3 представлена междупериодная временная структура реальной части принятого сигнала  $u_{pr}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , в котором присутствуют только сигналы, отраженные от приближающихся кромок лопастей несущего и рулевого винтов, а также часть шумовой помехи из области спектра, в которой существуют сигналы приближающихся кромок.

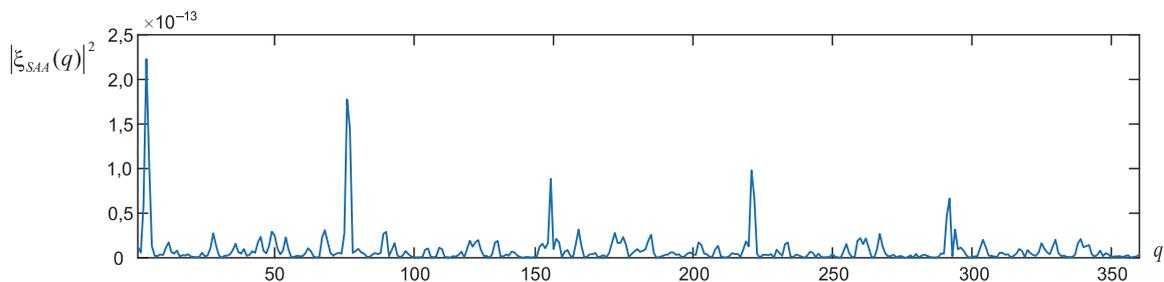


**Рис. 3.** Реальная часть принятого сигнала  $Re u_{pr}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , содержащая только сигналы от приближающихся кромок  
**Fig. 3.** The real part of the received signal  $Re u_{pr}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , containing only the signals from approaching edges

Изображение приближающихся (передних) кромок лопастей винта (винтов) строится с использованием  $N_{K\_SAA}$  каналов в горизонтальной (несущие винты) или вертикальной (тянущие винты, рулевой винт) плоскостях [7]. Каналы следуют с угловым интервалом  $\Delta\theta_K = \frac{360^\circ}{N_{K\_SAA}}$ .

РЛИ представляется в виде совокупности комплексных амплитуд  $\xi_{SAA}(q)$ ,  $q = \overline{1, N_{K\_SAA}}$ , относящихся к  $N_{K\_SAA}$  каналам.

На рис. 4 представлено РЛИ  $|\xi_{SAA}(q)|^2$ ,  $q = \overline{1, N_{K\_SAA}}$ , передних (приближающихся) кромок несущего винта вертолета Ми-8, построенное с использованием сигнала  $u_{pr}(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , при  $N_{K\_SAA} = 360$  и длительности интервала когерентной обработки  $T_{SAA} = 3\hat{T}_{VN}$ , где  $\hat{T}_{VN}$  – измеренное значение периода вращения несущего винта Ми-8. На этом рисунке отчетливо наблюдаются изображения приближающихся кромок пяти лопастей несущего винта Ми-8.



**Рис. 4.** Радиолокационное изображение передних кромок несущего винта вертолета Ми-8  
**Fig. 4.** Radar image of the leading edges of the main rotor of the Mi-8 helicopter

Анализ РЛИ усложняется при наблюдении летательных аппаратов, у которых в одной функциональной группе два и более винтов.

На рис. 5 приведено РЛИ приближающихся кромок тянущих винтов самолета Ан-24 (два четырехлопастных винта), построенное с использованием сигнала  $u_p(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , при  $N_{K\_SAA} = 360$  и  $T_{SAA} = 2\hat{T}_{VT}$ , где  $\hat{T}_{VT}$  – измеренное значение периода вращения тянущих винтов Ан-24.

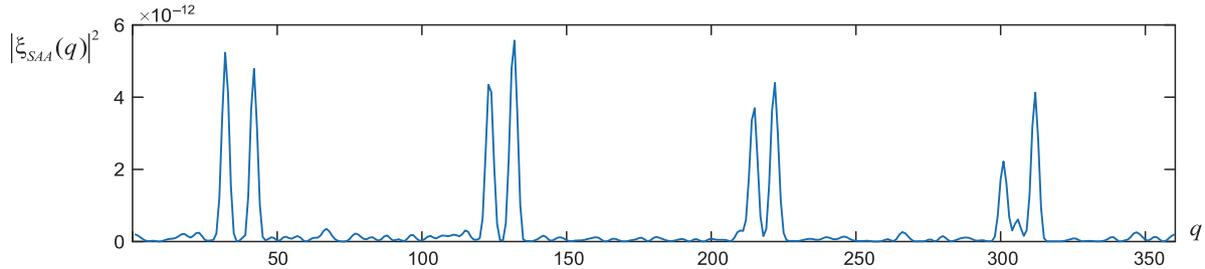


Рис. 5. Радиолокационное изображение передних кромок тянущих винтов самолета Ан-24  
Fig. 5. Radar image of the leading edges of the An-24 aircraft's tractor propellers

На рис. 6 представлено РЛИ приближающихся кромок несущих винтов квадрокоптера Z4-10 (четыре двухлопастных винта), построенное при  $N_{K\_SAA} = 360$  и  $T_{SAA} = 1,5\hat{T}_{VN}$ , где  $\hat{T}_{VN}$  – измеренное значение периода вращения несущих винтов Z4-10. По РЛИ на рис. 6 видно, что ЛА имеет несколько винтов, однако ответить на вопрос об их количестве сложно.

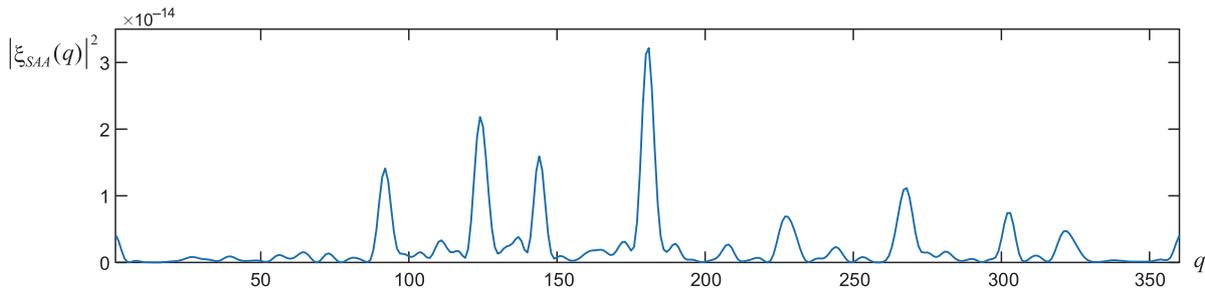


Рис. 6. Радиолокационное изображение передних кромок несущих винтов квадрокоптера Z4-10  
Fig. 6. Radar image of the leading edges of the rotors of the Z4-10 quadcopter

### Способ определения количества винтов в радиолокационном изображении

Способ определения количества винтов в РЛИ основан на периодичности следования изображений лопастей, принадлежащих одному винту. Исходными данными для рассматриваемого способа являются:

- изображение приближающихся кромок винта (винтов)  $\xi_{SAA}(q)$ ,  $q = \overline{1, N_{K\_SAA}}$ , построенное на основе измеренной в радиолокационной станции координатной информации о ЛА и оценки частоты вращения винта  $\hat{F}_V$ ;
- предполагаемое число лопастей в винте  $N_L$ , соответствующее полученной оценке частоты вращения винта  $\hat{F}_V$ .

Вначале выполняется расчет предполагаемого интервала следования изображений передних кромок лопастей в РЛИ

$$\Delta_{K\_SAA} = \frac{N_{K\_SAA}}{N_L}.$$

На основе значения  $\Delta_{K\_SAA}$  задается интервал  $k = \overline{1, K_L}$  возможных положений передних кромок всех лопастей в составе винта (винтов) ЛА, где  $K_L = \left[ \Delta_{K\_SAA} \right]_{\text{целая часть}}$  – максимальное количество возможных положений передних кромок всех лопастей (шагов при получении изображения винтов). Затем выполняется  $K_L$  циклических операций по свертке изображения одного винта в РЛИ и получению изображения винтов:

– для текущего значения  $k$  рассчитываются местоположения изображений передних кромок лопастей одного винта в РЛИ (причем для 1-й лопасти ( $g = 1$ )  $\theta_L(g) = k$ ):

$$\theta_L(g) = \left[ k + (g-1)\Delta_{K\_SAA} \right]_{\substack{\text{Целая} \\ \text{часть}}}, \quad g = \overline{1, N_L}; \quad (1)$$

– формирование свертки изображения винта для текущего значения  $k$ , которое может быть выполнено по трем вариантам:

- вариант 1 основан на произведении и имеет вид

$$Z_{S1}(k) = |\xi_{SAA}(\theta_L(1))| \times |\xi_{SAA}(\theta_L(2))| \times \dots \times |\xi_{SAA}(\theta_L(N_L))| = \prod_{g=1}^{N_L} |\xi_{SAA}(\theta_L(g))|, \quad (2)$$

где  $\prod_{g=1}^{N_L}$  – знак произведения по индексу  $g$ ;

- вариант 2 основан на сумме и имеет вид

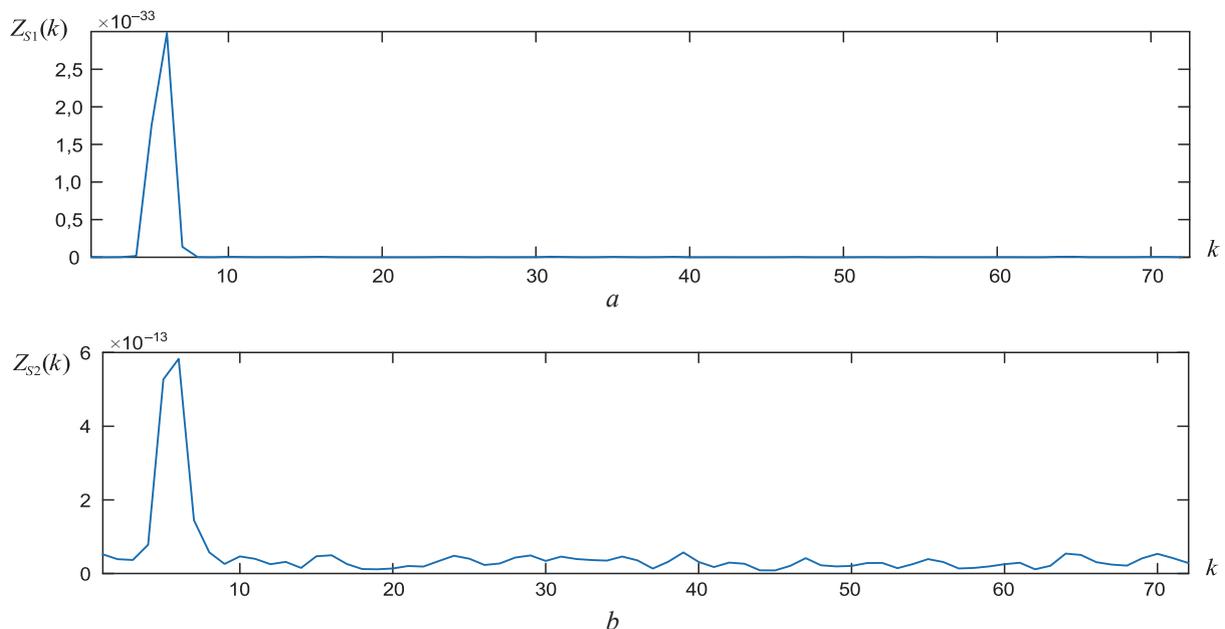
$$Z_{S2}(k) = |\xi_{SAA}(\theta_L(1))|^2 + |\xi_{SAA}(\theta_L(2))|^2 + \dots + |\xi_{SAA}(\theta_L(N_L))|^2 = \sum_{g=1}^{N_L} |\xi_{SAA}(\theta_L(g))|^2; \quad (3)$$

• вариант 3 объединяет процедуры, используемые в вариантах 1 и 2, и основан на квадрате суммы модулей

$$Z_{S3}(k) = \left( \sum_{g=1}^{N_L} |\xi_{SAA}(\theta_L(g))| \right)^2. \quad (4)$$

После выполнения всех  $k = \overline{1, K_L}$  циклов обработки получается изображение винтов  $Z_{S1(2,3)}(k)$ ,  $k = \overline{1, K_L}$ , по которому можно определить их количество.

На рис. 7–9 представлены изображения винтов для вертолета Ми-8, самолета Ан-24 и квадрокоптера Z4-10, полученные путем обработки РЛИ передних кромок лопастей (рис. 4–6) по вариантам 1 и 2. Изображения  $Z_{S1}(k)$ ,  $k = \overline{1, 72}$ , и  $Z_{S2}(k)$ ,  $k = \overline{1, 72}$ , полученные в результате обработки РЛИ горизонтальных винтов вертолета Ми-8 и представленные на рис. 7 а, б, однозначно указывают на наличие только одного несущего винта.

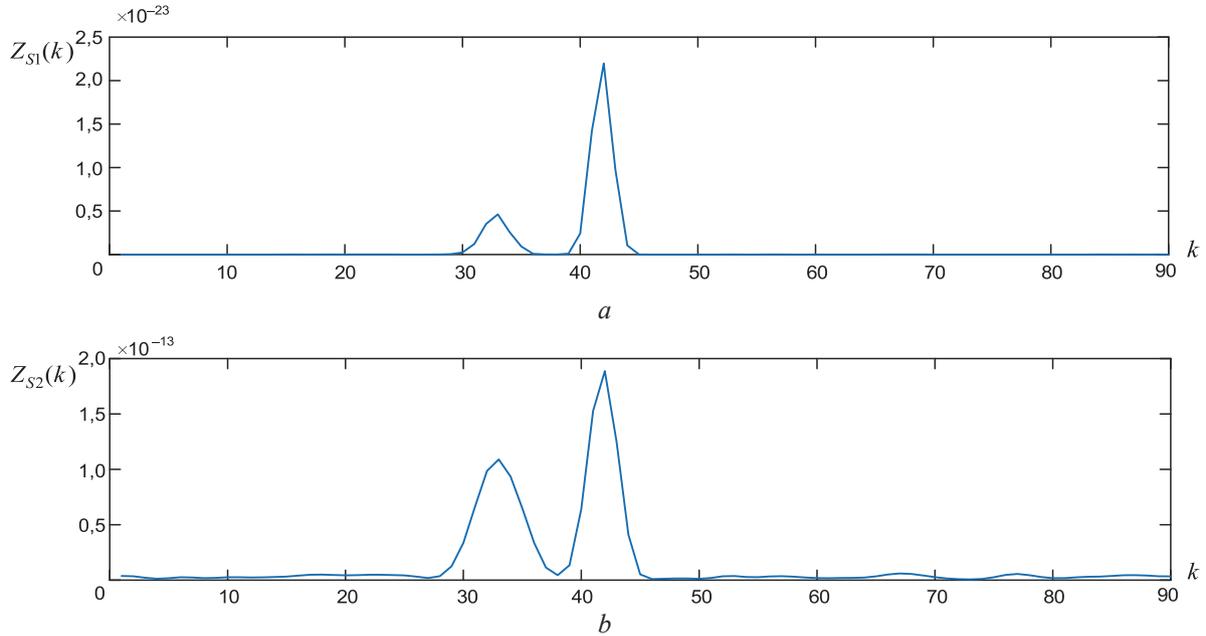


**Рис. 7.** Изображение винтов для вертолета Ми-8 по вариантам 1 (а) и 2 (б)  
**Fig. 7.** Image of propellers for the Mi-8 helicopter according to options 1 (a) and 2 (b)

Анализ изображений винтов для самолета Ан-24 (рис. 8, *a, b*), выполненный для  $k = \overline{1,90}$ , однозначно указывает на наличие двух тянущих винтов. Сопоставление изображений  $Z_{S1}(k)$ ,  $k = \overline{1,90}$ , и  $Z_{S2}(k)$ ,  $k = \overline{1,90}$ , демонстрирует следующее:

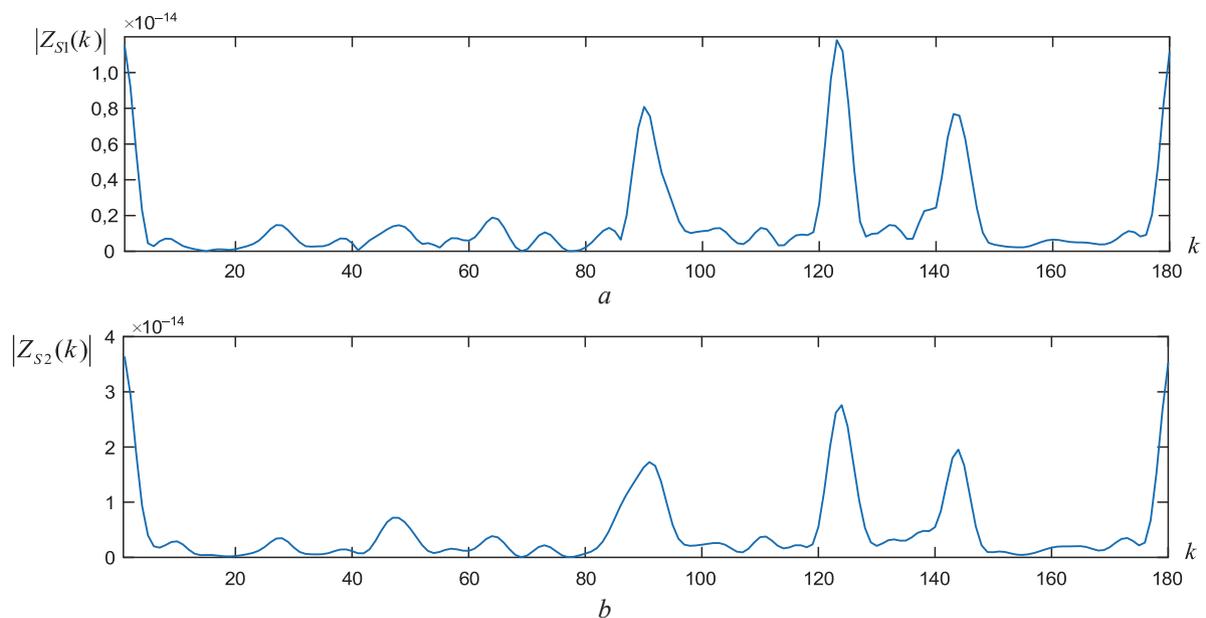
– вариант 1, основанный на произведении, обеспечивает более «контрастное» изображение винтов. Однако при низком уровне изображения одной из кромок лопастей в винте формируется низкий уровень  $Z_{S1}(k)$ ;

– вариант 2, основанный на сумме, обеспечивает более устойчивое формирование изображений винтов при любых соотношениях уровней изображений кромок лопастей.



**Рис. 8.** Изображение винтов для самолета Ан-24 по вариантам 1 (*a*) и 2 (*b*)  
**Fig. 8.** Image of propellers for the An-24 aircraft according to options 1 (*a*) and 2 (*b*)

Анализ изображений винтов для квадрокоптера Z4-10 (рис. 9, *a, b*), выполненный для  $k = \overline{1,180}$ , однозначно указывает на наличие четырех несущих винтов.



**Рис. 9.** Изображение винтов для квадрокоптера Z4-10 по вариантам 1 (*a*) и 2 (*b*)  
**Fig. 9.** Image of propellers for the Z4-10 quadcopter according to options 1 (*a*) and 2 (*b*)

Сопоставление изображений передних кромок лопастей  $|\xi_{SA}(q)|$ ,  $q = \overline{1, N_{K\_SA}}$ , и соответствующих им изображений винтов  $Z_{S1(2)}(k)$ ,  $k = \overline{1, K_L}$ , показывает, что изображение винта формируется на позиции изображения передней кромки лопасти, которая следует первой в текущем РЛИ. В свою очередь, расположение изображений передних кромок лопастей в РЛИ (рис. 4–6) соответствует расположению этих кромок в момент начала построения изображения.

### Заключение

1. Радиолокационное изображение винтов может быть использовано для распознавания класса (типа) наблюдаемого летательного аппарата, а также для селекции отметок летательных аппаратов определенного класса на фоне отметок движущихся наземных объектов. Радиолокационное изображение винтов летательного аппарата характеризует текущее расположение передних кромок лопастей у наблюдаемого летательного аппарата в плоскости вращения винтов. Анализ радиолокационного изображения лопастей винтов существенно усложняется по мере увеличения числа одинаковых винтов в составе летательного аппарата. Это усложнение обусловлено случайным взаимным расположением лопастей разных винтов в момент начала построения изображения, а также значительным увеличением (уменьшением) амплитуды сигнала в изображении при случайном совпадении пространственного положения лопастей, принадлежащих разным винтам.

2. Важной информацией, повышающей возможности распознавания (селекции) летательных аппаратов, является информация о количестве одинаковых винтов в составе аппарата. Она может быть получена на основе обработки радиолокационных изображений передних или задних кромок лопастей. В основе обработки лежит поиск регулярных структур, формируемых каждым винтом отдельно.

3. Способ определения количества винтов в летательном аппарате по радиолокационным изображениям разработан в трех вариантах – на основе: произведения (выражение (2)), суммирования (3), квадрата суммы изображений кромок (4), следующих с рассчитываемым интервалом (1). Все варианты работоспособны в условиях низкого отношения сигнал/шум (около 6 дБ, рис. 2) для спектральных составляющих «вторичной» модуляции, создаваемой винтами. Вариант 3 является наиболее привлекательным, так как объединяет процедуры, используемые в вариантах 1 и 2.

### Список литературы

1. Tait, P. Introduction to Radar Target Recognition / P. Tait. USA: Institution of Electrical Engineers, New York, 2005.
2. Shirman, Y. D. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering: Detection, Recognition and Tracking / Y. D. Shirman. Boston-London: Artech House, Inc., 2002.
3. Jacobs, S. P. Automatic Target Recognition Using Sequences of High Resolution Radar Range-Profiles / S. P. Jacobs, J. A. O'Sullivan // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2000. Vol. 36, No 2. P. 364–381. DOI: 10.1109/7.845214.
4. Гейстер, С. Р. Адаптивное обнаружение-распознавание с селекцией помех по спектральным портретам / С. Р. Гейстер. Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2000.
5. Гейстер, С. Р. Спектрально-временная структура сигналов, отраженных от движущихся наземных объектов, в приложении к обращенному синтезу апертуры антенны / С. Р. Гейстер, Н. Г. Пархоменко, А. С. Гейстер // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16, № 12. С. 27–33.
6. Гейстер, С. Р. Распознавание и измерение длины движущихся объектов в радиолокаторе с обращенным синтезом апертуры антенны / С. Р. Гейстер, Н. Г. Пархоменко, А. С. Гейстер // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16, № 11. С. 66–70.
7. Гейстер, С. Р. Алгоритмы построения радиолокационного изображения винтов в горизонтальной и вертикальной плоскостях летательного аппарата в радиолокационном датчике с обращенным синтезом апертуры антенны / С. Р. Гейстер, Т. Т. Нгуен // Доклады БГУИР. 2018. № 5. С. 92–98.
8. Гейстер, С. Р. Способ измерения частот следования лопастей винтов летательного аппарата на основе свертки спектра «вторичной» модуляции / С. Р. Гейстер, Т. Т. Нгуен // Доклады БГУИР. 2019. № 1. С. 68–74.
9. Гейстер, С. Р. Экспериментальные исследования алгоритмов построения радиолокационных изображений винтов и способа измерения частоты следования лопастей / С. Р. Гейстер, Т. Т. Нгуен // Доклады БГУИР. 2019. № 4. С. 72–78.

## References

1. Tait P. (2005) *Introduction to Radar Target Recognition*. USA, New York, Institution of Electrical Engineers.
2. Shirman Y. D. (2002) *Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering: Detection, Recognition and Tracking*. Boston-London, Artech House, Inc.
3. Jacobs S. P., O'Sullivan J. A. (2000) Automatic Target Recognition Using Sequences of High Resolution Radar Range-Profiles. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 36 (2), 364–381. DOI: 10.1109/7.845214.
4. Heister S. R. (2000) *Adaptive Detection-Recognition with Noise Selection Based on Spectral Portraits*. Minsk, Military Academy of the Republic of Belarus (in Russian).
5. Heister S. R., Parkhomenko N. G., Heister A. S. (2011) Spectral-Temporal Structure of Signals Reflected from Moving Ground Objects, in Application to Inverse Synthesis of the Antenna Aperture. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 16 (12), 27–33 (in Russian).
6. Heister S. R., Parkhomenko N. G., Heister A. S. (2011) Recognition and Measurement of the Length of Moving Objects in an Inverted Aperture Synthesis Radar. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 16 (11), 66–70 (in Russian).
7. Heister S. R., Nguyen T. T. (2018) Algorithms for Constructing a Radar Image of Propellers in the Horizontal and Vertical Planes of an Aircraft in a Radar Sensor with Inverted Antenna Aperture Synthesis. *Doklady BGUIR*. (5), 92–98 (in Russian).
8. Heister S. R., Nguyen T. T. (2019) A Method for Measuring the Repetition Rates of Aircraft Rotor Blades Based on Convolution of the “Secondary” Modulation Spectrum. *Doklady BGUIR*. (1), 68–74 (in Russian).
9. Heister S. R., Nguyen T. T. (2019) Experimental Studies of Algorithms for Constructing Radar Images of Propellers and a Method for Measuring Blade Repetition Rate. *Doklady BGUIR*. (4), 72–78 (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

**Гейстер С. Р.**, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр. ОАО «АЛЕВКУРП»

**Кириченко В. В.**, ст. науч. сотр. ОАО «АЛЕВКУРП»

## Адрес для корреспонденции

223050, Республика Беларусь,  
Минская обл., Минский р-н, Боровлянский с/с,  
д. Королев Стан, ул. Московская, 1а, ком. 17  
ОАО «АЛЕВКУРП»  
Тел.: +375 29 760-86-71  
E-mail: hsr\_aero1960@mail.ru  
Гейстер Сергей Романович

## Information about the authors

**Heister S. R.**, Dr. of. Sci. (Tech.), Professor, Chief Researcher at JSC “ALEVKURP”

**Kirychenka V. V.**, Senior Researcher at JSC “ALEVKURP”

## Address for correspondence

223050, Republic of Belarus,  
Minsk Region, Minsk District, Borovlyansky S/S,  
Korolev Stan Village, Moscow St., 1a, room 17  
JSC “ALEVKURP”  
Tel.: +375 29 760-86-71  
E-mail: hsr\_aero1960@mail.ru  
Heister Sergey Romanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-62-70>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.396

## ОЦЕНИВАНИЕ ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАНОСПУТНИКА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ РЕТРАНСЛЯЦИИ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ GPS

Е. А. КАПЛЯРЧУК<sup>1</sup>, С. В. КОЗЛОВ<sup>1</sup>, А. С. ШАПКИН<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 03.06.2024

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

**Аннотация.** Обоснован способ оценивания орбитальных параметров наноспутника-ретранслятора, реализуемый при измерении полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции навигационных сигналов GPS на частоты 150/400 МГц. Способ предусматривает оценку декартовых координат наноспутника-ретранслятора по результатам измерений суммарных дальностей «навигационный спутник – наноспутник-ретранслятор – наземный приемный пункт», получение оценок угла наклона плоскости орбиты и долготы восходящего узла методом наименьших квадратов и оценку оставшихся орбитальных параметров методом максимального правдоподобия. Приведены результаты моделирования и характеристики точности предлагаемого метода. Показано, что при типовом отношении сигнал/шум в аппаратуре приемного пункта и времени наблюдения наноспутника-ретранслятора 600–800 с средние квадратические ошибки оценивания орбитальных параметров наноспутника-ретранслятора составляют: для угловых величин – доли угловых секунд, большой полуоси эллипса – 4–5 м, эксцентриситета – 2–3 ppm.

**Ключевые слова:** наноспутник-ретранслятор, глобальная навигационная спутниковая система GPS, навигационный сигнал, полное электронное содержание, орбитальные параметры, метод наименьших квадратов.

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

**Для цитирования.** Каплярчук, Е. А. Оценивание орбитальных параметров наноспутника при измерении полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции навигационных сигналов GPS / Е. А. Каплярчук, С. В. Козлов, А. С. Шапкин // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 62–70. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-62-70>.

## ESTIMATING THE ORBITAL PARAMETERS OF A NANOSATELLITE WHEN MEASURING THE TOTAL ELECTRON CONTENT IN THE IONOSPHERE BASED ON THE RETRANSMISSION OF GPS NAVIGATION SIGNALS

EVGENIY A. KAPLARCHUK<sup>1</sup>, SERGEY V. KOZLOV<sup>1</sup>, ALIAKSANDR S. SHAPKIN<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus  
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 03.06.2024

**Abstract.** A method for estimating the orbital parameters of a nanosatellite-relay, implemented by measuring the total electron content in the ionosphere based on relaying GPS navigation signals at frequencies of 150/400 MHz, is substantiated. The method involves estimating the Cartesian coordinates of the nanosatellite-relay based on the results of measurements of the total ranges “navigation satellite – nanosatellite relay – ground receiving point”, obtaining estimates of the orbital plane inclination angle and the longitude of the ascending node using the least squares method, and estimating the remaining orbital parameters using the maximum likelihood method. Simulation results and accuracy characteristics of the proposed method are presented. It is shown that for a typical signal-to-noise ratio in the equipment of the receiving point and an observation time of the nanosatellite-relay of 600–800 s, the mean square errors in estimating the orbital parameters of the nanosatellite-relay are: for angular quantities – fractions of arc seconds, the semi-major axis of the ellipse – 4–5 m, eccentricity – 2–3 ppm.

**Keywords:** repeater nanosatellite, global navigation satellite system GPS, navigation signal, total electron content, orbital parameters, least squares method.

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

**For citation.** Kaplarchuk E. A., Kozlov S. V., Shapkin A. S. (2024) Estimating the Orbital Parameters of a Nanosatellite When Measuring the Total Electron Content in the Ionosphere Based on the Retransmission of GPS Navigation Signals. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 62–70. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-62-70> (in Russian).

### Введение

Задача оценивания полного электронного содержания (ПЭС) и последующего восстановления пространственного распределения электронной концентрации в ионосфере имеет важное значение для теории и практики [1–3]. В [4] обоснован способ оценивания ПЭС на основе ретрансляции навигационных сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) GPS с использованием наноспутника-ретранслятора (НР) (наноспутник – космический аппарат с массой 1–10 кг). Наиболее экономичный вариант способа предусматривает прием и частотную фильтрацию навигационных сигналов GPS на частоте  $f_1 = 1575,42$  МГц бортовой аппаратурой НР, перенос сигналов на частоты  $f_{p1} = 150$  и  $f_{p2} = 400$  МГц, усиление и излучение ретранслируемых сигналов в сторону Земли. Прием ретранслированных сигналов осуществляется одним или несколькими наземными приемными пунктами (ПП), в качестве которых предложено использовать приемные станции спутниковой системой точного позиционирования (ССТП) Республики Беларусь с модернизированной аппаратурой. При этом на основе измерения суммарных дальностей  $\hat{d}_{f_1, f_{p1(2)}}$  и образования их разностей в обоснованных в [4] комбинациях реализуется измерение полного электронного содержания  $\overline{TEC}^{(II)}$  на трассе НР–ПП. В [5] обоснованы алгоритмы цифровой обработки принимаемого сигнала с измерением суммарной дальности навигационный спутник (НС)–НР–ПП и оценкой ПЭС.

При практической реализации способа [4] оценивания ПЭС необходимы орбитальные параметры (ОП) НР, которые используются для прогнозирования моментов входа НР в зону прямой видимости с ПП и определения опорных параметров обработки принимаемого ПП сигнала: дальностей между НС–НР и НР–ПП и производных указанных дальностей. Хотя получение ОП принципиально возможно и из других источников (например, из TLE-файлов системы NORAD), однако определение координат и параметров движения НР желательно осуществлять без привлечения внешних источников, что вызывает необходимость использования для этих целей ретранслированного навигационного сигнала. Кроме того, проблема точного определения координат и параметров движения объектов на околоземных орбитах существенно усложняется как резким

возрастанием их количества, так и засорением наиболее используемых орбит космическим мусором [6]. В этих условиях применение внешних источников информации может оказаться, во-первых, ненадежным, во вторых – экономически не оправданным.

Цель исследований авторов – обоснование способа оценки координат и параметров движения наноспутника-ретранслятора на основе ретрансляции сигналов GPS при оценивании ПЭС.

### Структура способа оценивания орбитальных параметров

Структура предлагаемого способа оценивания ОП приведена на рис. 1.



Рис. 1. Последовательность оценивания орбитальных параметров

Fig. 1. Sequence of orbital parameters estimation

Примем, что для единичных оценок координат НР доступны признаки видимости  $V_{n,k} = \overline{0;1}$   $n$ -го навигационного спутника GPS одновременно с НР и  $k$ -го ПП и оценки  $\overline{d_{f_1, f_{p1(2)}}^{(n,k)}}$  суммарных дальностей « $n$ -й навигационный спутник GPS – наноспутник-ретранслятор –  $k$ -й приемный пункт», измеренные по ретранслированным на частоты  $f_{p1(2)}$  навигационным сигналам GPS. Индексы навигационных спутников  $n = \overline{1, N}$ , где  $N$  – общее число НС в ГНСС GPS, индексы приемных пунктов  $k = \overline{1, K}$ . Число видимых НС для  $k$ -го ПП (видимых с учетом кривизны Земли и диаграммы направленности приемной антенны бортового ретранслятора) составляет  $N_{GPS_k} = \sum_{n=1}^N V_{n,k}$ ,

так что общее число единичных измерений суммарных дальностей  $L = \sum_{k=1}^K N_{GPS_k}$ . Орбиту НР полагаем достаточно высокой (800–1000 км), при этом величиной ПЭС на трассах НС–НР можно пренебречь. При использовании более низких (500–600 км) типовых орбит НР с учетом расположения максимума электронной концентрации в ионосфере на высотах 250–400 км и быстрого убывания электронной концентрации по высоте существенная ошибка измерения суммарной дальности может наблюдаться только для НС, находящихся под малыми (до 5°) углами места относительно НР. Поэтому такие НС при определении ОП могут быть исключены из обработки.

Ввиду движения НС и НР по заданным орбитам и ПП в соответствии с вращением Земли, наиболее удобно использовать неподвижную декартовую геоцентрическую систему координат. Ось  $Oz$  этой системы координат направлена на географический северный полюс,  $Ox$  лежит в экваториальной плоскости и направлена на фиксированную точку на небесной сфере, причем угол между Гринвичским меридианом и осью  $Ox$  неподвижной системы координат известен, ось  $Oy$  дополняет систему координат до правой.

В соответствии с [4] скорректируем измеренные суммарные дальности с учетом результатов измерения ПЭС на трассах  $n$ -й НР– $k$ -й ПП

$$\tilde{d}_{n,k} = \overline{d_{f_1, f_{p1}}^{(n,k)}} - \frac{A \cdot \overline{TEC_k^{(II)}}}{f_{p1}^2}, \quad (1)$$

где  $\overline{TEC_k^{(II)}}$  – результаты измерения ПЭС на трассах НР– $k$ -й ПП с учетом усреднения по всем видимым с этого ПП навигационным спутникам;  $A = 40,308 \text{ м}^3/\text{с}^2$ .

Отметим, что измерения  $\overline{d_{f_1, f_{p2}}^{(n,k)}}$  на второй частоте ретрансляции использованы при оценке  $\overline{TEC_k^{(II)}}$  [4].

### Оценивание декартовых координат наноспутника

Полагая ошибки оценивания скорректированных суммарных дальностей  $\tilde{d}_{n,k}$  гауссовскими с нулевым математическим ожиданием и дисперсиями  $\sigma_{n,k}^2$ , запишем логарифм функции правдоподобия в виде

$$\Lambda(x_{\text{нр}}, y_{\text{нр}}, z_{\text{нр}}) = - \sum_{k=1}^K \sum_{\substack{n=1 \\ V_{n,k}=1}}^N \frac{[\tilde{d}_{n,k} - d_{n,k}(x_{\text{нр}}, y_{\text{нр}}, z_{\text{нр}})]^2}{\sigma_{n,k}^2}, \quad (2)$$

где  $d_{n,k}(x_{\text{нр}}, y_{\text{нр}}, z_{\text{нр}})$  – истинная суммарная дальность  $n$ -й НС–НР– $k$ -й ПП на момент измерения:

$$d_{n,k}(x_{\text{нр}}, y_{\text{нр}}, z_{\text{нр}}) = \sqrt{(x_n - x_{\text{нр}})^2 + (y_n - y_{\text{нр}})^2 + (z_n - z_{\text{нр}})^2} + \sqrt{(x_{\text{пп}_k} - x_{\text{нр}})^2 + (y_{\text{пп}_k} - y_{\text{нр}})^2 + (z_{\text{пп}_k} - z_{\text{нр}})^2}; \quad (3)$$

$(x_n, y_n, z_n)$  – декартовы координаты  $n$ -го НС;  $(x_{\text{пп}_k}, y_{\text{пп}_k}, z_{\text{пп}_k})$  – декартовы координаты ПП.

Максимально правдоподобная оценка вектора координат НР по всем измерениям

$$(\hat{x}_{\text{нр}}, \hat{y}_{\text{нр}}, \hat{z}_{\text{нр}})^T = \arg \max_{x_{\text{нр}}, y_{\text{нр}}, z_{\text{нр}}} \Lambda(x_{\text{нр}}, y_{\text{нр}}, z_{\text{нр}}). \quad (4)$$

При малых ошибках измерений суммарных дальностей корреляционная матрица ошибок оценивания в декартовых координатах определяется выражением вида [7, 8]

$$\mathbf{R} = (\mathbf{H}^T \mathbf{\Phi}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \quad (5)$$

где  $\mathbf{\Phi}$  – диагональная матрица дисперсий измерений всех суммарных дальностей размером  $L \times L$  с элементами на главной диагонали  $\sigma_{n(\ell), k(\ell)}^2$ ,  $\ell = 1, L$ , в соответствии с порядком индексации и признаками видимости;  $n(\ell), k(\ell)$  – индексы НС и ПП, соответствующие  $\ell$ -й измеренной дальности;  $\mathbf{H}$  – матрица статического пересчета изменений декартовых координат в изменения суммарных дальностей вида [7]:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \frac{\partial d_{n(\ell), k(\ell)}(x_{\text{нр}}, y_{\text{нр}}, z_{\text{нр}})}{\partial x_{\text{нр}}} & \frac{\partial d_{n(\ell), k(\ell)}(x_{\text{нр}}, y_{\text{нр}}, z_{\text{нр}})}{\partial y_{\text{нр}}} & \frac{\partial d_{n(\ell), k(\ell)}(x_{\text{нр}}, y_{\text{нр}}, z_{\text{нр}})}{\partial z_{\text{нр}}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial d_{n(L), k(L)}(x_{\text{нр}}, y_{\text{нр}}, z_{\text{нр}})}{\partial x_{\text{нр}}} & \frac{\partial d_{n(L), k(L)}(x_{\text{нр}}, y_{\text{нр}}, z_{\text{нр}})}{\partial y_{\text{нр}}} & \frac{\partial d_{n(L), k(L)}(x_{\text{нр}}, y_{\text{нр}}, z_{\text{нр}})}{\partial z_{\text{нр}}} \end{pmatrix}.$$

### Оценивание орбитальных параметров наноспутника-ретранслятора

В рамках рассматриваемого способа предполагается, что НР движется по эллиптической орбите с произвольным значением эксцентриситета. Центр Земли совпадает с одним из фокусов эллипса. Как известно [9], такая орбита полностью описывается шестью орбитальными параметрами: углом наклона орбиты  $\gamma$ , долготой восходящего узла  $\Omega$ , большой полуосью  $a$ , эксцентриситетом  $e$ , аргументом перицентра  $\omega$  и временем прохождения перицентра  $t_0$ . Иллюстрация указанных параметров, за исключением  $t_0$ , показана на рис. 2. Система координат  $Oxyz$  – неподвижная геоцентрическая, плоскость  $xOy$  совпадает с экватором, ось  $Oz$  направлена на северный полюс,  $Ox$  – в направлении Гринвичского меридиана, например, в момент начала текущих суток (UTC = 0), ось  $Oy$  дополняет систему до правой.

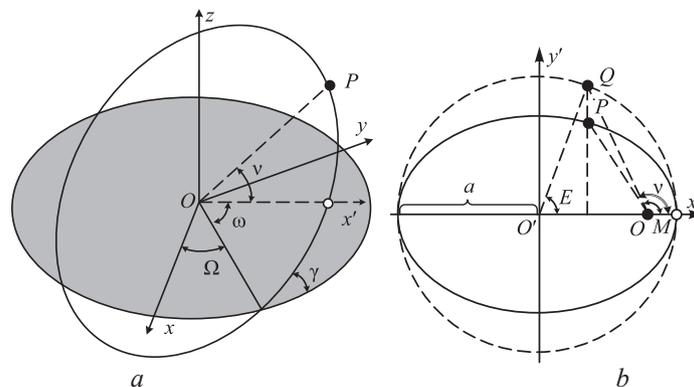


Рис. 2. Иллюстрации орбитальных параметров (а), эксцентрической и истинной аномалий (б)  
Fig. 2. Illustrations of orbital parameters (a), eccentric and true anomalies (b)

На рис. 2, *b* показана иллюстрация эксцентрической  $E$  и истинной  $v$  аномалий, а также среднего движения  $M$ , используемых в расчетных соотношениях ниже. Система координат  $O'x'y'$  – вспомогательная и лежит в орбитальной плоскости, точка  $O'$  расположена посередине между фокусами эллипса, ось  $O'x'$  ориентирована на перицентр. Будем полагать, что доступными для определения ОП являются  $m = 1, M$  результатов измерения декартовых координат НР, полученных в моменты времени  $t_m$  на одном из интервалов видимости НР с ПП. Возмущающие факторы, влияющие на ОП НР в пределах интервала видимости (Луна, аномалии гравитационного поля Земли, влияние атмосферы и т. д.), считаем фиксированными.

Оценивание ОП можно проводить последовательно. Сначала оценивается пара параметров  $(\gamma, \Omega)$ . Уравнение орбитальной плоскости в неподвижной геоцентрической системе координат запишется в виде

$$Ax + By + Cz = 0, \text{ или } \mathbf{w}^T \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = 0, \quad (6)$$

где  $\mathbf{w} = \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \gamma \sin \Omega \\ -\sin \gamma \cos \Omega \\ \cos \gamma \end{pmatrix}$  – нормальный вектор орбитальной плоскости.

Для  $m$ -го измерения  $\boldsymbol{\psi}_m = (\hat{x}_m, \hat{y}_m, \hat{z}_m)^T$  координат НР расстояние  $\xi_m = \sin \gamma \sin \Omega \cdot \hat{x}_m - \sin \gamma \sin \Omega \cdot \hat{y}_m + \cos \gamma \cdot \hat{z}_m = \mathbf{w}^T \boldsymbol{\psi}_m$ ;  $\boldsymbol{\psi}_m = (\hat{x}_m, \hat{y}_m, \hat{z}_m)^T$  между измерениями и орбитальной плоскостью – гауссовская случайная величина с дисперсией  $\sigma_{\xi_m}^2 = \mathbf{w}^T \mathbf{R}_m \mathbf{w}$ . Так как все точки орбиты должны принадлежать искомой плоскости, то максимально правдоподобные оценки угла наклона плоскости орбиты и долготы восходящего узла

$$(\hat{\gamma}, \hat{\Omega}) = \arg \min_{\gamma, \Omega} \sum_{m=1}^M \frac{|\mathbf{w}^T(\gamma, \Omega) \hat{\boldsymbol{\psi}}_m|^2}{\mathbf{w}^T(\gamma, \Omega) \mathbf{R}_m \mathbf{w}(\gamma, \Omega)}. \quad (7)$$

При примерно равноточных измерениях выражение (7) можно упростить за счет отказа от вычисления дисперсии в знаменателе и сформулировать оптимизационную задачу в виде нахождения уравнения проходящей через центр Земли плоскости, для которой сумма квадратов расстояний результатов измерений декартовых координат от указанной плоскости минимальна:

$$(\hat{\gamma}, \hat{\Omega}) = \arg \min_{\gamma, \Omega} \sum_{m=1}^M (\sin \gamma \sin \Omega \cdot \hat{x}_m - \sin \gamma \sin \Omega \cdot \hat{y}_m + \cos \gamma \cdot \hat{z}_m)^2. \quad (8)$$

После определения нормального вектора орбитальной плоскости находим другие ОП: большую полуось  $a$ , эксцентриситет  $e$  и аргумент перицентра  $\omega$ , а также время прохождения перицентра  $t_0$ . Выражение для радиус-вектора орбиты имеет вид [9]

$$r_m = \frac{p}{1 + e \cos(v_m - \omega)} = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos(v_m - \omega)}. \quad (9)$$

Взаимосвязи ОП в (9) описываются как:

$$p = a(1 - e^2); \quad v_m = 2 \arctg \frac{E_m}{2} \cdot \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}; \\ E_m - e \sin E_m = M_m; \quad M_m = n(t_m - t_0); \quad n = \sqrt{\frac{K}{a^3}} = \frac{2\pi}{T}, \quad (10)$$

где  $p$  – фокальный параметр;  $E$  – эксцентрическая аномалия;  $n$  – среднее движение;  $M$  – средняя аномалия, соответствующая истинной аномалии  $v$  в момент времени  $t_m$ ;  $K$  – гравитационная постоянная Земли;  $T$  – период обращения НР;  $E_m - e \sin E_m = M_m$  – решается методом последовательных приближений.

Декартовы координаты НР для момента времени  $t_m$  запишем в виде

$$\boldsymbol{\zeta}_{\text{ср}m}(a, e, \omega, t_0) = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{M}_z(\hat{\Omega}) \mathbf{M}_x(\hat{\gamma}) \begin{pmatrix} r_m \cos v_m \\ r_m \sin v_m \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где  $\mathbf{M}_z(\widehat{\Omega})$ ,  $\mathbf{M}_x(\widehat{\gamma})$  – матрицы вращения относительно осей  $Oz$  и  $Ox$ :

$$\mathbf{M}_z(\Omega) = \begin{pmatrix} \cos \Omega & -\sin \Omega & 0 \\ \sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{M}_x(\gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix}.$$

Тогда оценки максимального правдоподобия орбитальных параметров

$$(\widehat{a}, \widehat{e}, \widehat{\omega}, \widehat{t}_0) = \arg \min_{a, e, \omega, t_0} \sum_{m=1}^M (\widehat{\Psi}_m - \zeta_m)^T \mathbf{R}_m^{-1} (\widehat{\Psi}_m - \zeta_m). \quad (12)$$

Оптимизационная задача (12) оказывается достаточно сложной. Для ее упрощения используем следующий прием. Вычислим оценки истинных аномалий по единичным измерениям декартовых координат

$$\widehat{v}_m = \arccos \frac{\widehat{\Psi}_m \cdot \widehat{\mathbf{f}}}{|\widehat{\Psi}_m| \cdot |\widehat{\mathbf{f}}|}, \quad (13)$$

где  $\widehat{\mathbf{f}} = (\cos \widehat{\Omega}, \sin \widehat{\Omega}, 0)^T$ .

За счет (13) можно отказаться от оптимизации по  $\widehat{t}_0$  в (12) и для примерно равнозначных измерений сформулировать оптимизационную задачу по оценке в виде

$$(\widehat{a}, \widehat{e}, \widehat{\omega}) = \arg \min_{a, e, \omega} \sum_{m=1}^M |\widehat{\Psi}_m - \zeta_m|^2, \quad (14)$$

где  $\zeta_m$  – рассчитывается согласно (9) и (11).

Далее, используя полученные оценки пяти ОП, остается оценить  $\widehat{t}_0$

$$\widehat{t}_0 = \arg \min_{t_0} \sum_{m=1}^M |\widehat{\Psi}_m - \zeta_m(\widehat{a}, \widehat{e}, \widehat{\omega}, \widehat{\gamma}, \widehat{\Omega}, t_0)|^2. \quad (15)$$

После оценки ОП уравнение движения НР примет вид

$$\begin{pmatrix} x_{\text{НР}}(t) \\ y_{\text{НР}}(t) \\ z_{\text{НР}}(t) \end{pmatrix} = \mathbf{M}_z(\widehat{\Omega}) \mathbf{M}_x(\widehat{\gamma}) \begin{pmatrix} r(t) \cos v(t) \\ r(t) \sin v(t) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

где  $r(t)$ ,  $v(t)$  – определяются по (9), (11) путем подстановки в них найденных оценок ОП и соответствующего момента времени  $t$ .

Путем дифференцирования (16) могут быть найдены составляющие вектора скорости НР по осям координат. Отметим, что при задании координат НР и составляющих скорости для некоторого момента времени далее может быть выполнено интегрирование уравнений движения НР с учетом различных возмущающих, но детерминированных факторов: неравномерности гравитационного поля Земли, влияния Луны, остатков атмосферы и т. д. [9].

Особенность предлагаемого способа – последовательное решение трех оптимизационных задач для оценивания:

- 1) нормального вектора орбитальной плоскости;
- 2) большой полуоси эллипса, эксцентриситета и аргумента перицентра;
- 3) времени прохождения перицентра, а также использования оценок истинных аномалий, рассчитываемых по единичным измерениям декартовых координат после определения нормального вектора орбитальной плоскости.

### Результаты моделирования и их обсуждение

Исследование эффективности предлагаемого способа определения ОП проводилось методом имитационного моделирования с использованием цифрового двойника системы низкоорбитального контроля ионосферы. Цифровой двойник воспроизводит перемещения заданного числа НР и НС по заданным орбитам, перемещение приемных пунктов ССТП при вращении Земли, определение взаимного пространственного положения и видимости НС, НР и ПП, а также имитирует распределение электронной концентрации в ионосфере и результаты оценивания ПЭС на трассах НР–ПП за заданное время наблюдения. Типовая ситуация наблюдения при пролете НР в пределах прямой видимости с ПП, расположенными на территории Беларуси, показана на рис. 3.

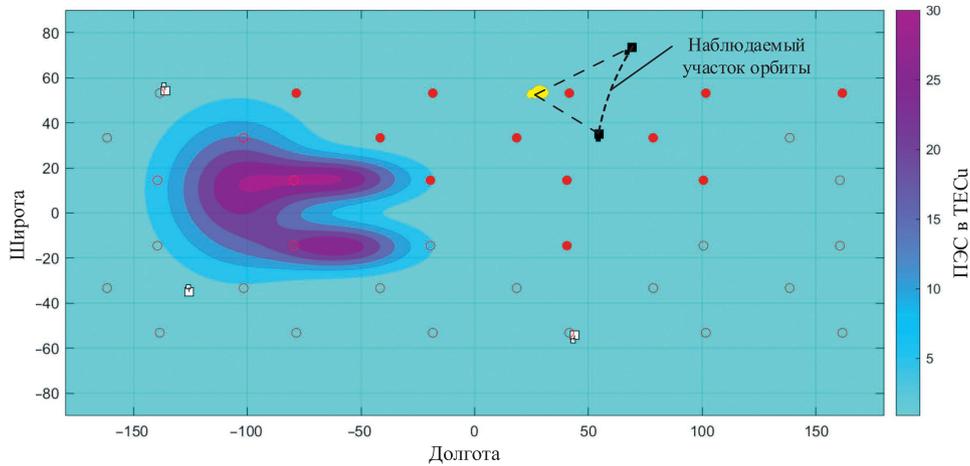


Рис. 3. Пространственная ситуация при моделировании  
Fig. 3. Spatial situation during modeling

На рис. 3 справа цветом показаны значения вертикального ПЭС с вертикальной шкалой в TECu. Положение НР на орбите показано прямоугольником белого цвета, если НР находится вне зоны видимости, и черного цвета, если он в зоне видимости. Положение ПП ССТП на территории Беларуси отмечено желтыми точками. Закрашенными (видимые) и незакрашенными (вне зоны видимости) маркерами показаны подспутниковые точки НС GPS в начальный момент времени. Время видимости НР хотя бы одним ПП составляет 700 с, центральный угол наблюдаемого участка орбиты – около  $40^\circ$ .

Оценка проводилась методом статистического моделирования (100 реализаций) для случая наличия единственного ПП при времени когерентного накопления 20 мс и интервале времени между единичными измерениями координат НР 10 с. При указанных в [4] параметрах аппаратуры отношение сигнал/шум на выходе когерентного накопителя составило 24,0 и 15,5 дБ, для частот ретрансляции – 150 и 400 МГц, что практически гарантирует отсутствие аномальных ошибок измерения дальности. Считается, что определяющий вклад в среднеквадратическую ошибку измерения дальности вносят погрешности навигационно-временного обеспечения, эфемерид, расхождения шкал времени, фактор многолучевого распространения принимаемого сигнала и т. д. [10]. Результирующая средняя квадратическая ошибка (СКО) измерения дальности принималась равной 25 м, что существенно больше, чем флуктуационная ошибка измерения дальности при указанном отношении сигнал/шум. Время наблюдения орбиты НР принималось 700 и 90 с, что соответствует наблюдению 1/8 и 1/64 частей орбиты при дискретности измерения декартовых координат 10 с. Результаты расчета статистических параметров оценивания ОП для случая наблюдения частей орбиты в 1/8 и 1/64 от витка приведены в табл. 1.

Таблица 1. Средние квадратические ошибки оценивания орбитальных параметров  
Table 1. Root mean square errors in estimating orbital parameters

Наименование параметра	Средняя квадратическая ошибка оценивания параметра при доле наблюдаемой части орбиты	
	1/8	1/64
Угол наклона плоскости орбиты $\sigma_\gamma$ , град.	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
Долгота восходящего узла $\sigma_\Omega$ , град.	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$
Большая полуось эллипса $\sigma_a$ , м	4,1	85
Эксцентриситет $\sigma_e$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$
Аргумент перицентра $\sigma_\omega$ , град.	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$
Время прохождения перицентра $\sigma_{t_0}$ , с	0,017	0,167
Расстояние между истинным и экстраполированным на одни сутки положением спутника: математическое ожидание/среднеквадратическое отклонение, км	0,53/0,40	9,2/7,4
Составляющие скорости по осям $\sigma_{V_x}, \sigma_{V_y}, \sigma_{V_z}$ , м/с	0,085/0,078/0,017	0,18/0,14/0,35

В дополнение к указанным в табл. 1 данным следует отметить, что математическое ожидание расстояния между истинным и экстраполированным на одни сутки положениями спутника составило 0,53 и 9,20 км при наблюдении соответственно 1/8 и 1/64 частей орбиты при СКО указанных величин 0,4 и 7,4 км.

Как следует из приведенных в табл. 1 результатов, достигаемая точность оценивания ОП весьма высокая даже при наличии только одного ПП. В частности, при прогнозировании координат НР на сутки при использовании всей доступной для наблюдения части орбиты (примерно 1/8 часть витка) математическое ожидание расстояния между истинным и прогнозируемым положениями НР не превышает 1 км, что полностью соответствует потребностям практики. Уменьшение наблюдаемой части орбиты до 1/64 части витка приводит к закономерному ухудшению точности оценивания, причем точность оценивания первых двух из шести параметров (угла наклона плоскости орбиты и долготы восходящего узла) ухудшается примерно пропорционально уменьшению времени наблюдения. Точность оценивания других параметров, за исключением аргумента перигея, ухудшается значительно быстрее. При увеличении числа ПП, а также уменьшении периода измерений декартовых координат СКО оценивания ОП уменьшаются пропорционально квадратному корню из коэффициента увеличения числа независимых измерений.

### Заключение

1. Представленный способ оценивания орбитальных параметров наноспутника-ретранслятора может быть модифицирован для случая ретрансляции сигнала на одну частоту с переходом к разностно-дальномерному способу оценивания декартовых координат для исключения неизвестного полного электронного содержания на трассе распространения.

2. Высокая точность определения орбитальных параметров, простота и компактность бортовой аппаратуры для реализации способа, отсутствие необходимости размещения на борту специализированной аппаратуры потребителя глобальной навигационной спутниковой системы, способной измерять координаты при высоких радиальных скоростях и ускорениях между наноспутником-ретранслятором и навигационным спутником, а также линии связи для передачи измеренных ею координат спутника на наземный пункт управления определяют возможность и целесообразность использования предлагаемого способа для нахождения орбитальных параметров микро- и наноспутников.

### Список литературы

1. Куницын, В. Е. Радиотомография ионосферы / В. Е. Куницын, Е. Д. Терещенко, Е. С. Андреева. М.: Физматлит, 2007.
2. Determination of Total Electron Content in the Ionosphere Over the Territory of the Republic of Belarus Based on Global Navigation Satellite Systems Data / A. O. Naumov [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series. 2024. Vol. 69, No 1. P. 53–64.
3. Methods and Software for Estimation of Total Electron Content in Ionosphere Using GNSS Observations / A. Naumov [et al.] // Engineering Applications. 2023. Vol. 2, No 3. P. 243–253.
4. Способ оценивания полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS / И. В. Белоконов [и др.] // Информатика. 2023. Т. 20, № 2. С. 7–27. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27>.
5. Обработка ретранслированных навигационных сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS в задаче оценивания полного электронного содержания в ионосфере / Е. А. Каплярчук [и др.] // Информатика. 2023. Т. 20, № 3. С. 21–36. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-21-36>.
6. Соколов, Н. Л. Метод определения орбитальных параметров космического мусора бортовыми средствами космического аппарата / Н. Л. Соколов // Труды МАИ (электронный журнал). 2014. № 77. С. 1–19.
7. Ширман, Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. М.: Радио и связь, 1981.
8. Саврасов, Ю. С. Алгоритмы и программы в радиолокации / Ю. С. Саврасов. М.: Радио и связь, 1985.
9. Дубошин, Г. Н. Небесная механика. Основные задачи и методы / Г. Н. Дубошин. М.: Наука, 1975.
10. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова; 4-е изд., перераб. М.: Изд-во «ИПРЖР», 2010.

## References

1. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D., Andreeva E. S. (2007) *Radiotomography of the Ionosphere*. Moscow, Fizmatlit Publ. (in Russian).
2. Naumov A. O., Khmarskiy P. A., Byshnev N. I., Piatrouski M. A. (2024) Determination of Total Electron Content in the Ionosphere Over the Territory of the Republic of Belarus Based on Global Navigation Satellite Systems Data. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*. 69 (1), 53–64.
3. Naumov A., Khmarskiy P., Byshnev N., Piatrouski M. (2023) Methods and Software for Estimation of Total Electron Content in the Ionosphere Using GNSS Observations. *Engineering Applications*. 2 (3), 243–253.
4. Belokonov I. V., Krot A. M., Kozlov S. V., Kapliarchuk Y. A., Savinykh I. E., Shapkin A. S. (2023) A Method for Estimating the Total Electron Content in the Ionosphere Based on the Retransmission of Signals from the Global Navigation Satellite System GPS. *Informatics*. 20 (2), 7–27. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27> (in Russian).
5. Kapliarchuk Y. A., Kozlov S. V., Savinykh I. E., Shapkin A. S. (2023) Processing of Relayed Navigation Signals of the Global Navigation Satellite System GPS in the Problem of Estimating the Total Electron Content in the Ionosphere. *Informatics*. 20 (3), 21–36. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-21-36> (in Russian).
6. Sokolov N. L. (2014) Method for Determining the Orbital Parameters of Space Debris by On-Board Means of the Spacecraft. *Proceedings of MAI (Electronic Journal)*. (77), 1–19 (in Russian).
7. Shirman Ya. D., Manzhos V. N. (1981) *Theory and Technology of Processing Radar Information Against a Background of Interference*. Moscow, Radio i Sviyaz Publ. (in Russian).
8. Savrasov Yu. S. (1985) *Algorithms and Programs in Radar*. Moscow, Radio i Sviyaz Publ. (in Russian).
9. Duboshin G. N. (1975) *Celestial Mechanics. Basic Tasks and Methods*. Moscow, Nauka Publ. (in Russian).
10. Perova A. I., Kharisova V. N. (ed.) (2010) *GLONASS. Principles of Construction and Operation; 4<sup>th</sup> ed., Revised*. Moscow, Publishing House “IPRZhR” (in Russian).

## Вклад авторов

Каплярчук Е. А. разработал основные операции способа, математическую модель, выполнил моделирование.

Козлов С. В. предложил структуру способа определения орбитальных параметров.

Шапкин А. С. принял участие в моделировании и обобщил результаты.

## Authors' contribution

Kaplarchuk E. A. developed the main operations of the method, a mathematical model, performed modeling.

Kozlov S. V. proposed the structure of a method for determining the orbital parameters.

Shapkin A. S. took part in the modeling and summarized the results.

## Сведения об авторах

**Каплярчук Е. А.**, инж.-програм., фрилансер

**Козлов С. В.**, д-р техн. наук, проф., проф. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

**Шапкин А. С.**, асп., Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси

## Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-89-11  
E-mail: kozlov@bsuir.by  
Козлов Сергей Вячеславович

## Information about the authors

**Kaplarchuk E. A.**, Software Engineer, Freelancer

**Kozlov S. V.**, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Information Radiotechnologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Shapkin A. S.**, Graduate Student, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus

## Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-89-11  
E-mail: kozlov@bsuir.by  
Kozlov Sergei Vyacheslavovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-71-79>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 004.021

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ АЛГОРИТМА ФАЗОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

М. И. ПОРХУН, М. И. ВАШКЕВИЧ

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

*Поступила в редакцию 21.06.2024*

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

**Аннотация.** Рассмотрены два алгоритма вычисления фазового преобразования, заключающегося в расчете выходов цепочки фазовых звеньев. В основе алгоритмов лежит идея синтеза сдвоенного фазового звена, которое позволяет за один проход вычислять выходы каскада из двух фазовых звеньев. Для синтеза сдвоенных фазовых звеньев использовано представление цифровых фильтров методом пространства состояний. Предложенные алгоритмы реализованы на языке Си, выполнено их сравнение с прямой формой реализации фазового преобразования. В процессе экспериментов при помощи встроенного в среду Visual Studio профилировщика оценивалась скорость вычисления цепочки фазовых звеньев на персональном компьютере с процессором Intel Core i7-37700. Полученные результаты показали, что оба алгоритма позволяют ускорить вычисление цепочки фазовых звеньев в 1,3 и 1,8 раза соответственно.

**Ключевые слова:** фазовое преобразование, цепочка фазовых звеньев, пространство состояний, сдвоенное фазовое звено.

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

**Для цитирования.** Порхун, М. И. Метод повышения скорости выполнения алгоритма фазового преобразования / М. И. Порхун, М. И. Вашкевич // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 71–79. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-71-79>.

## A METHOD FOR SPEED UP THE ALLPASS TRANSFORMATION ALGORITHM

MAXIM I. PORHUN, MAXIM I. VASHKEVICH

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

*Submitted 21.06.2024*

**Abstract.** Two algorithms for calculating the phase transformation, which consists in calculating the outputs of a chain of phase links, are considered. The algorithms are based on the idea of synthesis of a dual phase link, which allows calculating the outputs of a cascade of two-phase links in one pass. To synthesize dual phase links, the representation of digital filters by the space state method is used. The proposed algorithms are implemented in the C language, and they are compared with the direct form of implementation of the phase transformation. During the experiments, the speed of calculating the chain of phase links on a personal computer with an Intel Core i7-37700 processor was estimated using the profiler built into the Visual Studio environment. The results showed that both algorithms allow accelerating the calculation of the chain of phase links by 1.3 and 1.8 times, respectively.

**Keywords:** phase transformation, allpass chain, state-space, dual allpass filter.

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

**For citation.** Porhun M. I., Vashkevich M. I. (2024) A Method for Speed Up the Allpass Transformation Algorithm. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 71–79. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-71-79> (in Russian).

## Введение

Фазовое преобразование [1] используется во многих прикладных задачах цифровой обработки сигналов. Суть его применения сводится к получению в системе обработки звука неравномерного частотного разрешения [2], что особенно важно при моделировании частотной избирательности слуха [3]. Расчет фазового преобразования представляет собой вычисление выходов цепочки (каскада) фазовых звеньев (ФЗ). При этом выход каждого отдельного звена в каскаде является выходом фазового преобразования.

Рассмотрим несколько практических примеров использования фазового преобразования в системах цифровой обработки сигналов. В [4] фазовое преобразование применялось для реализации дискретного преобразования Фурье с неравномерным частотным разрешением, которое использовалось для выявления сигналов с множественными узкополосными компонентами. В [5] фазовое преобразование применялось для создания звуковых эквалайзеров на БИХ-фильтрах (фильтрах с бесконечной импульсной характеристикой), учитывающих разрешающую способность слуха. В [6] фазовое преобразование интегрировано в спектральный анализ методом Берга для улучшения разрешающей способности на низких частотах.

Фазовое преобразование также может быть использовано для синтеза фильтров, моделирующих работу слуховой системы человека (кохлеарные фильтры). Они широко применяются для построения моделей слухового восприятия, которые используются во многих практических приложениях обработки аудиосигналов (кодерах, системах подавления шума, симуляторах потери слуха и проч.). В качестве кохлеарных фильтров часто применяются банки гамматон- и гаммачирп-фильтров. Их отличительная особенность – достаточно высокая вычислительная сложность. Одним из возможных способов решения данной проблемы является замена банка фильтров на более простой с вычислительной точки зрения, но близкий по характеристикам к искомому. В [7] предложено использовать неравнополосный косинусно-модулированный банк фильтров (НКМБФ) для аппроксимации банка гамматон-фильтров. Фазовое преобразование – ключевой этап реализации НКМБФ.

При создании систем обработки звука, основанных на фазовом преобразовании, центральной проблемой становится непосредственно сама реализация цепочки фазовых звеньев (ЦФЗ) [8, 9]. На практике длина цепочки может превышать 1000 звеньев [8]. При этом обработка звука происходит на частоте дискретизации входного сигнала. Помимо того, алгоритм прямой формы реализации фазового преобразования имеет зависимость по данным, что затрудняет его распараллеливание. В статье предложен метод повышения скорости выполнения алгоритма фазового преобразования, основанный на синтезе структуры сдвоенного фазового звена, которое позволяет за один вычислительный проход получать выходы каскада, состоящего из двух фазовых звеньев.

## Фазовое преобразование

Фазовое преобразование заключается в замене в линейной стационарной системе элементов задержки на фазовые звенья [1]. В статье рассматриваются ФЗ первого порядка

$$A(z) = \frac{z^{-1} - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}}, \quad |\alpha| < 1. \quad (1)$$

Благодаря применению фазового преобразования выполняется трансформация частотной характеристики системы [10]. В качестве примера рассмотрим применение фазового преобразования к КИХ-фильтру (фильтру с конечной импульсной характеристикой). На рис. 1 показана схема КИХ-фильтра до и после применения фазового преобразования.

Изменяя коэффициент  $\alpha$  фазового звена (формула (1)), можно изменять частотную характеристику фильтра и, в частности, регулировать полосу частот, пропускаемых им. На рис. 2 показан пример трансформации частотной характеристики фильтра при использовании фазового преобразования. Можно заметить, что в зависимости от знака параметра  $\alpha$  происходит либо растяжение, либо сжатие частотного диапазона.

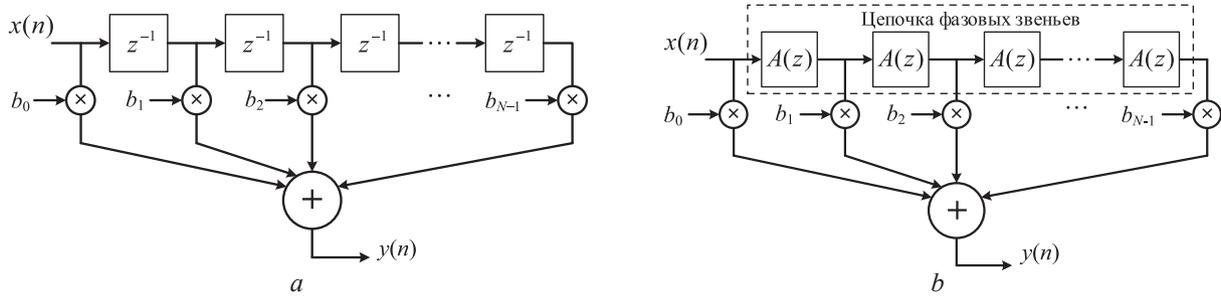


Рис. 1. Структура КИХ-фильтра: *a* – исходная; *b* – после применения фазового преобразования  
Fig. 1. FIR-filter structure: *a* – original; *b* – after allpass transformation

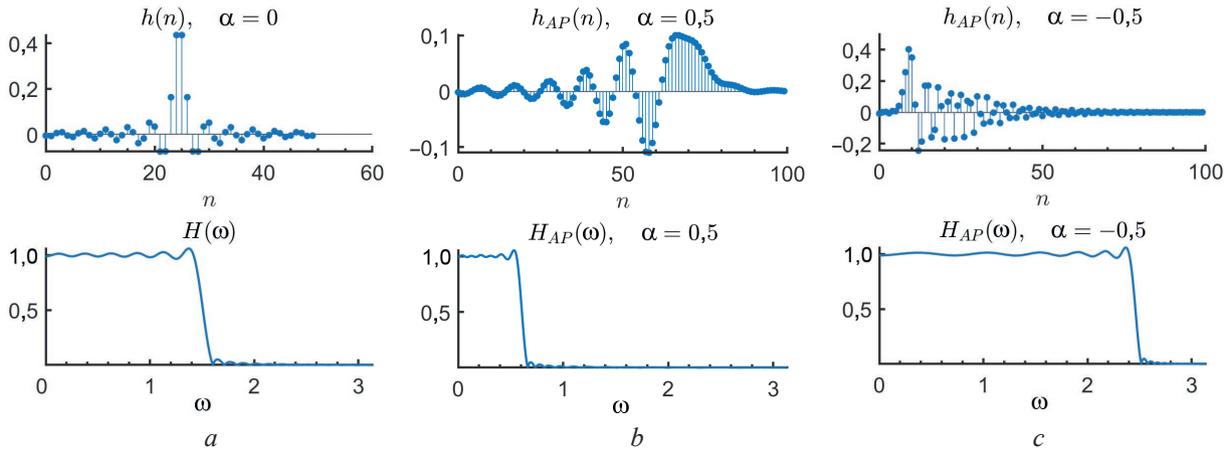


Рис. 2. Временная и частотная характеристики КИХ-фильтра:  
*a* – исходного; *b*, *c* – после применения фазового преобразования с  $\alpha = 0,5$  и  $\alpha = -0,5$  соответственно  
Fig. 2. Time and frequency responses of the FIR-filter:  
*a* – original; *b*, *c* – after applying the phase transformation with  $\alpha = 0.5$  and  $\alpha = -0.5$ , respectively

Рассмотрим вопрос реализации ЦФЗ (рис 1, *b*), которая является практическим выражением фазового преобразования. Передаточная функция (1) соответствует разностному уравнению

$$y(n) = x(n-1) - \alpha x(n) + \alpha y(n-1) = x(n-1) + \alpha (y(n-1) - x(n)). \quad (2)$$

Таким образом, вычислительная сложность фазового звена равна двум сложениям и одному умножению (считается, что сложение и вычитание имеют одинаковые затраты). Для реализации (2) требуется два элемента задержки (памяти) для хранения предыдущего входного и выходного отсчетов. Используя метод пространства состояния, можно получить реализацию (2), которая требует всего одного элемента памяти [11]:

$$\begin{aligned} y(n) &= (1 - \alpha^2)w(n-1) - \alpha x(n) = Bw(n-1) - \alpha x(n); \\ w(n) &= \alpha w(n-1) + x(n), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $B = 1 - \alpha^2$ ;  $w(n)$  – переменная внутреннего состояния.

Систему уравнений (3) можно переписать в матричном виде

$$\begin{bmatrix} w(n) \\ y(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & 1 \\ B & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w(n-1) \\ x(n) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Для реализации (3) необходимы два сложения, три умножения и один элемент задержки для хранения переменной состояния  $w(n-1)$ . Однако при экономии элементов памяти увеличивается число операций умножения. Преимущество подобной реализации будет более ясным после рассмотрения задачи реализации ЦФЗ.

### Проблема реализации цепочки фазовых звеньев

Как было сказано ранее, основной трудностью при построении систем обработки звука на базе фазового преобразования является непосредственно реализация ЦФЗ. На практике число элементов  $N$  ЦФЗ находится в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен [8]. Структура ЦФЗ, реализованная согласно (2), показана на рис. 3.

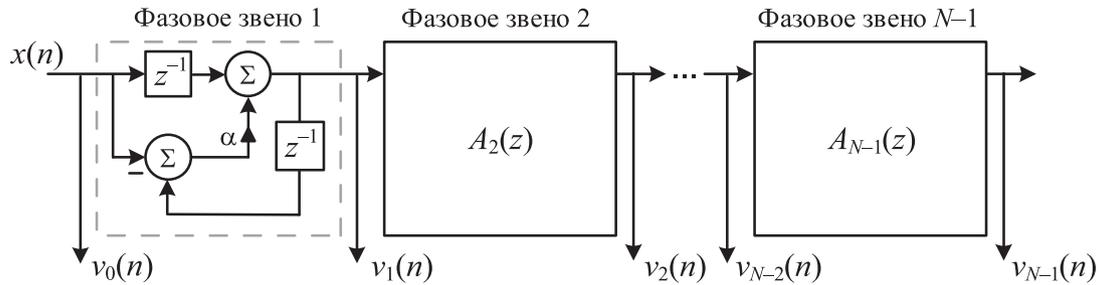


Рис. 3. Цепочка фазовых звеньев  
Fig. 3. Allpass chain

При поступлении одного нового входного отсчета сигнала  $x(n)$  необходимо вычислить все  $N$  выходов ЦФЗ, между которыми существует зависимость по данным (выход одного звена является входом для последующего). Кроме этого, дальнейшие вычисления не могут осуществляться, пока не рассчитаны выходы всех элементов ЦФЗ. Таким образом, в системах обработки звука на основе фазового преобразования критически важным является время вычисления всех выходов ЦФЗ.

Для выполнения анализа времени вычисления выходов ЦФЗ представим алгоритм расчета выхода одного фазового звена в ярусно-параллельной форме (рис. 4).

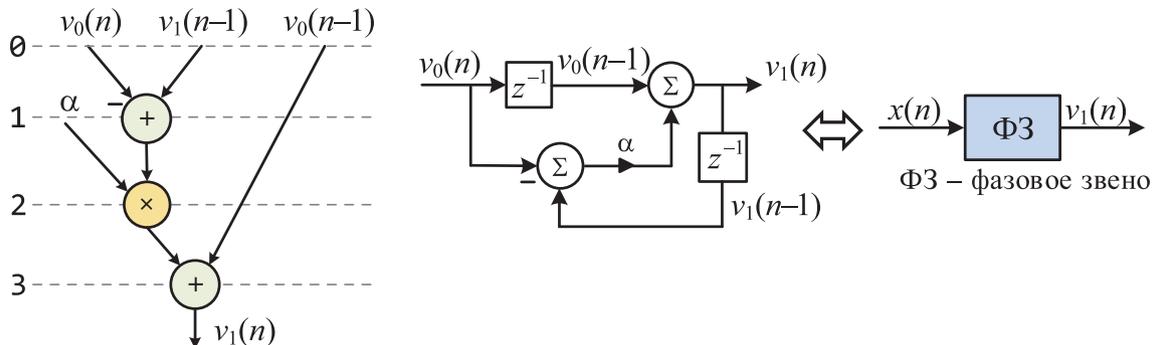


Рис. 4. Ярусно-параллельная форма алгоритма вычисления выхода фазового звена  
Fig. 4. Directed computational graph of the allpass filter

Из ярусно-параллельной формы видно, что алгоритм вычисления выхода фазового звена разделен на три яруса. Нулевой ярус представляет собой входные данные. Предположим, что ЦФЗ состоит из  $N$  элементов. В таком случае общее количество ярусов алгоритма составит  $3N$ . Число ярусов крайне важно, поскольку оно открывает возможность для параллельных вычислений. Это связано с тем, что на каждом ярусе выполняются расчеты, непосредственно связанные с результатами вычислений на предыдущем ярусе. Таким образом, реализация ЦФЗ согласно структуре, показанной на рис. 3, будет занимать  $3N$  условных тактов.

### Параллельное вычисление каскада из двух фазовых звеньев

Предлагается синтезировать структуру сдвоенного ФЗ, выполняющего в едином вычислительном процессе вычисление выходов каскада из двух фазовых звеньев. На рис. 5 показан каскад из двух ФЗ, в котором каждое звено реализовано с использованием метода пространства состояний, т. е. согласно уравнению (4).

Предположим, что вектор  $[w_2(n-1) \ w_1(n-1) \ x(n)]^T$  является входом данной структуры, а вектор  $[w_2(n) \ w_1(n) \ v_2(n) \ v_1(n)]^T$  – выходом. Тогда каскад из двух фазовых звеньев может быть представлен выражением

$$\begin{bmatrix} w_2(n) \\ w_1(n) \\ v_2(n) \\ v_1(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ B & 0 & -\alpha \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 1 \\ 0 & B & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_2(n-1) \\ w_1(n-1) \\ x(n) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $x(n)$  – входной сигнал;  $w_1(n-1)$ ,  $w_2(n-1)$  – внутреннее состояние первого и второго звеньев соответственно;  $v_1(n)$ ,  $v_2(n)$  – выходы первого и второго звеньев;  $w_1(n)$ ,  $w_2(n)$  – внутренние состояния первого и второго звеньев в момент времени  $n$ .

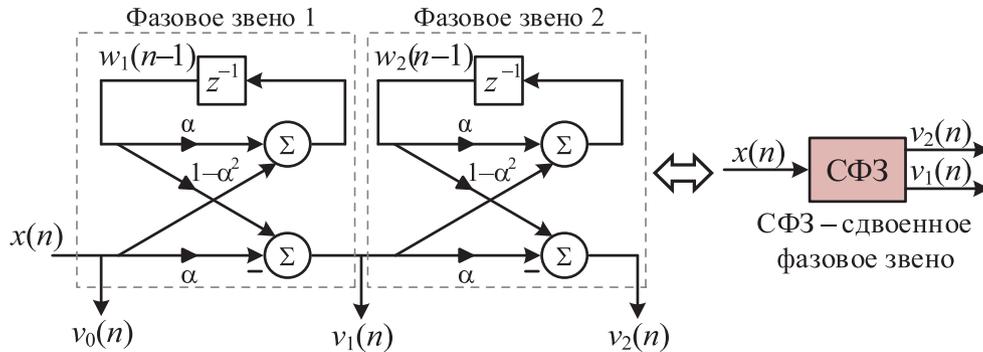


Рис. 5. Каскад из двух фазовых звеньев, реализованных с использованием техники пространства состояний  
Fig. 5. Cascade of two allpass filters, implemented using state-space approach

Согласно выражению (5), можно построить ярусно-параллельную форму алгоритма (рис. 6) вычисления сдвоенного фазового звена (СФЗ).

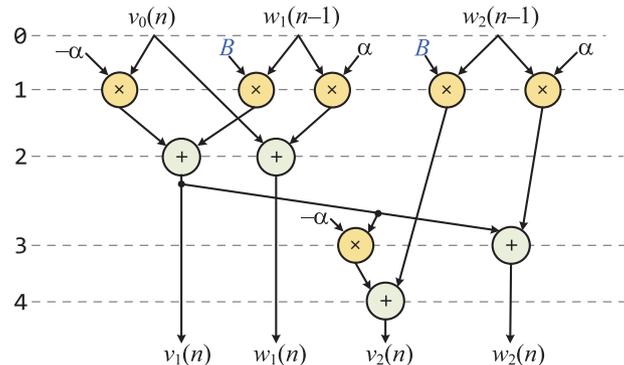


Рис. 6. Ярусно-параллельная форма алгоритма вычисления выхода сдвоенного фазового звена, вариант 1  
Fig. 6. Computational graph of the dual allpass filter, variant 1

Блок-схема СФЗ, вариант 1 (СФЗ-в1), показана на рис. 7.

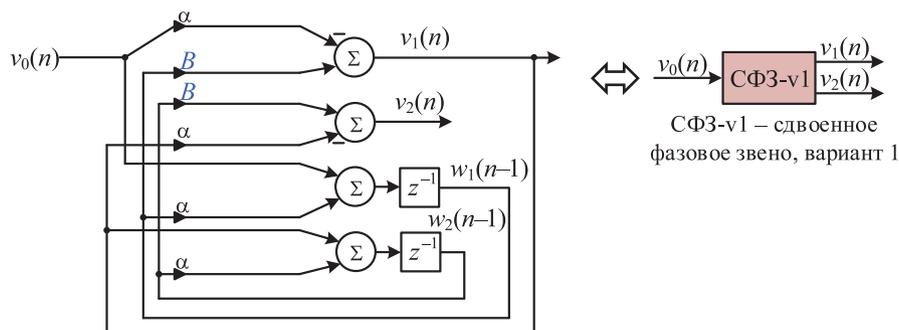


Рис. 7. Блок-схема сдвоенного фазового звена, вариант 1 (СФЗ-в1)  
Fig. 7. Block-scheme of the dual allpass filter, variant 1 (DAF-v1)

Выражение (5) можно упростить, если выполнить умножение матриц:

$$\begin{bmatrix} w_2(n) \\ w_1(n) \\ v_2(n) \\ v_1(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & B & -\alpha \\ 0 & \alpha & 1 \\ B & C & A \\ 0 & B & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_2(n-1) \\ w_1(n-1) \\ x(n) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $A = \alpha^2$ ;  $C = -\alpha(1 - \alpha^2)$ .

Проанализировав (6), можно увидеть, что во втором и третьем столбцах встречаются одинаковые элементы. Это позволяет сократить число операций, требуемых для вычисления выходных значений. Таким образом, согласно выражению (6), получаем новый вариант алгоритма вычисления СФЗ, ярусно-параллельная форма которого приведена на рис. 8.

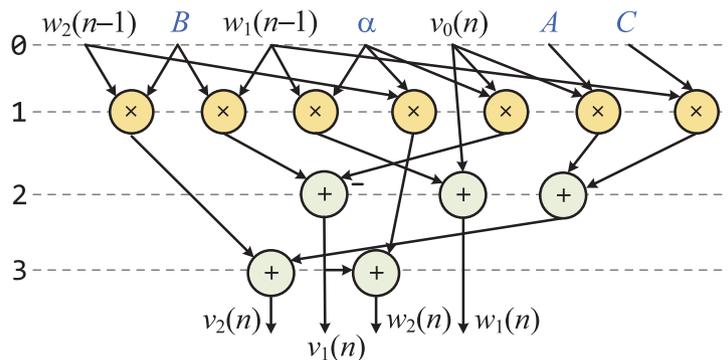


Рис. 8. Ярусно-параллельная форма алгоритма вычисления выхода двойного фазового звена, вариант 2  
Fig. 8. Block-scheme of the dual allpass filter, variant 2

Блок-схема СФЗ, вариант 2 (СФЗ-в2), показана на рис. 9.

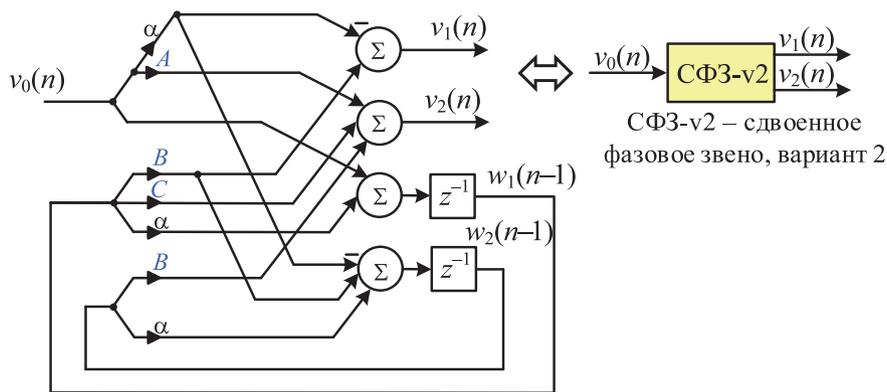


Рис. 9. Блок-схема двойного фазового звена, вариант 2 (СФЗ-в2)  
Fig. 9. Block-scheme of the dual allpass filter, variant 2 (DAF-v2)

Расчет выхода каскада из двух фазовых звеньев (СФЗ-в1), согласно (5), соответствует четырехъярусному алгоритму, а СФЗ-в2, согласно (6), – трехъярусному. При этом число ярусов в СФЗ-в2 такое же, какое было у алгоритма вычисления выхода одного фазового звена, реализуемого по уравнению (2). Сравнение вычислительных затрат на реализацию каскада из двух ФЗ показано в табл. 1.

Таблица 1. Вычислительные затраты на реализацию каскада из двух фазовых звеньев  
Table 1. Computational costs for implementation a cascade of two allpass filters

Вариант реализации	Прямая форма	СФЗ-в1	СФЗ-в2
Число сложений	4	4	5
Число умножений	2	6	7
Число ярусов	6	4	3

С точки зрения вычислительных затрат, реализация СФЗ-*v1* требует шесть умножений и четыре сложения, а СФЗ-*v2* – семь умножений и пять сложений. Если реализовывать каскад из двух ФЗ согласно (2), то потребуется всего два умножения и четыре сложения (считается, что вычитание и сложение эквивалентны по сложности). Следовательно, реализации СФЗ-*v1* и СФЗ-*v2* имеют повышенную вычислительную сложность, но позволяют сократить время вычисления за счет распараллеливания. Таким образом, с точки зрения скорости расчета, алгоритм СФЗ-*v1* в полтора, а алгоритм СФЗ-*v2* в два раза эффективнее, чем прямая реализация (2) каскада из двух ФЗ.

### Экспериментальные исследования

С целью оценки эффективности алгоритмов вычисления фазового преобразования согласно предложенным структурам сдвоенного фазового звена проведены вычислительные эксперименты. Для этого программным образом на языке Си описаны прямая форма реализации ЦФЗ (формула (2)), а также алгоритмы вычисления СФЗ-*v1* и СФЗ-*v2* по формулам (5) и (6) соответственно. Система обработки звука представляла собой ЦФЗ, состоящую из 2048 фазовых звеньев. На выход системы подавался звуковой сигнал  $x(n)$ , представляющий собой синусоиду длительностью  $10^6$  отсчетов с частотой дискретизации 44,1 кГц. Анализ вычислительных затрат выполнялся при помощи встроенного в Visual Studio 2022 профилировщика. Эксперимент проводился на базе ПК с восьмиядерным процессором Intel Core i7-37700 (тактовая частота 3,4 ГГц). Оценка вычислительных затрат для каждой реализации выполнялась 10 раз, после чего полученные значения усреднялись. На рис. 10 показаны результаты экспериментов.

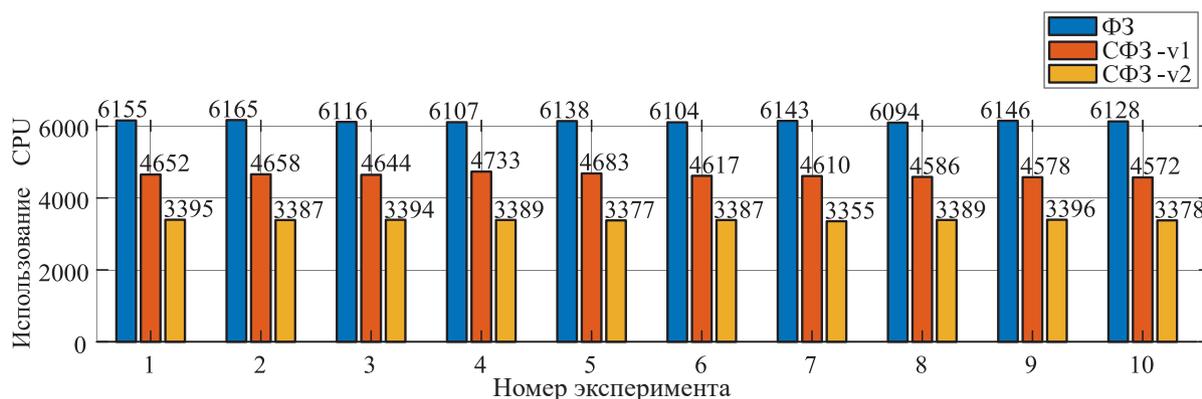


Рис. 10. Результаты вычислительных экспериментов  
Fig. 10. Results of computational experiments

По результатам экспериментов оценка производительности прямой формы реализации ЦФЗ составила  $(6129,6 \pm 22)$  единиц времени ЦП (центрального процессора), параллельной формы СФЗ-*v1* –  $(4633,3 \pm 48)$ , а параллельной формы СФЗ-*v2* –  $(3384,7 \pm 11)$  единиц времени ЦП. Таким образом, процесс вычисления выходов цепочки фазовых звеньев с использованием СФЗ-*v1* по сравнению с прямой формой ускоряется в 1,31 раза, а с использованием СФЗ-*v2* – в 1,81 раза.

### Заключение

1. Предложены две структуры сдвоенного фазового звена, основанные на технике представления фильтра методом пространства состояний. Соответствующие данным структурам алгоритмы позволяют ускорить процесс вычисления выходов цепочки фазовых звеньев. Дана оценка эффективности реализации алгоритмов.
2. Проведены вычислительные эксперименты. Для этого программным образом на языке Си выполнена реализация функции вычисления прямой формы реализации цепочки фазовых звеньев, а также параллельной формы согласно предложенным структурам.
3. Каждый из двух алгоритмов позволяет ускорить вычисление выходов цепочки фазовых звеньев в 1,31 и 1,81 раза соответственно.

### Список литературы

1. Vary, P. Digital Filter Banks with Unequal Resolution / P. Vary // Short Communication Digest of European Signal Processing Conference (EUSIPCO). 1980. P. 41–42.
2. Evangelista, G. Auditory Modeling Via Frequency Warped Wavelet Transform / G. Evangelista, S. Cavaliere // 9<sup>th</sup> European Signal Processing Conference (EUSIPCO). 1998. P. 1–4.
3. Нечаев, Д. И. Частотная избирательность слуха / Д. И. Нечаев, Е. В. Сысуева // Сенсорные системы. 2015. Т. 29, № 3. С. 181–200.
4. Kwon, O. Efficient Detection of Multi-Narrowband Using the Warped Discrete Fourier Transform / O. Kwon // Journal of Computer Science. 2018. Vol. 6, No 1. P. 26–33.
5. Bank, B. Warped, Kautz, and Fixed-Pole Parallel Filters: A Review / B. Bank // Journal of the Audio Engineering Society. 2022. Vol. 70, No 6. P. 414–434.
6. Frequency Warped Burg's Method for AR-Modeling / K. Roth [et al.] // 2003 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics. 2003. P. 5–8.
7. Порхун, М. И. Оптимизационный метод проектирования фильтра-прототипа для аппроксимации частотных характеристик гамматон-фильтров при помощи неравнополосного косинусно-модулированного банка фильтров / М. И. Порхун, М. И. Вашкевич // Цифровая обработка сигналов и ее применение: докл. XXVI Междунар. конф., г. Москва, 27–29 марта 2024 г. М.: Рос. науч.-техн. общ. радиотех., электроники и связи им. А. С. Попова, 2024. С. 71–76.
8. Gülzow, T. Comparison of a Discrete Wavelet Transformation and a Nonuniform Polyphase Filterbank Applied to Spectral-Subtraction Speech Enhancement / T. Gülzow, A. Engelsberg, U. Heute // Signal Processing. 1998. Vol. 64, No 1. P. 5–19.
9. Вашкевич, М. И. Анализ ошибок округления при реализации цепочки фазовых звеньев в арифметике с фиксированной запятой / М. И. Вашкевич // Цифровая обработка сигналов. 2021. № 2. С. 12–18.
10. Вашкевич, М. И. Сравнение частотно-временных преобразований: Фурье-анализ, вейвлеты и банки фильтров на основе фазового преобразования / М. И. Вашкевич, И. С. Азаров // Цифровая обработка сигналов. 2020. № 2. С. 13–26.
11. Roberts, R. A. Digital Signal Processing / R. A. Roberts, C. T. Mullis. Boston: Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1987.

### References

1. Vary P. (1980) Digital Filter Banks with Unequal Resolution. *Short Communication Digest of European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. 41–42.
2. Evangelista G., Cavaliere S. (1998) Auditory Modeling Via Frequency Warped Wavelet Transform. *9<sup>th</sup> European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. 1–4.
3. Nechaev D. I., Sysueva E. V. (2015) Frequency Selectivity of Hearing. *Sensory Systems*. 29 (3), 181–200.
4. Kwon O. (2018) Efficient Detection of Multi-Narrowband Using the Warped Discrete Fourier Transform. *Journal of Computer Science*. 6 (1), 26–33.
5. Bank B. (2022) Warped, Kautz, and Fixed-Pole Parallel Filters: A Review. *Journal of the Audio Engineering Society*. 70 (6), 414–434.
6. Roth K., Kauppinen I., Esquef P. A. A., Valimaki V. (2003) Frequency Warped Burg's Method for AR-Modeling. *2003 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*. 5–8.
7. Porhun M. I., Vashkevich M. I. (2024) Optimization Method for Design a Prototype Filter for Approximation Frequency Characteristics of Gammaton Filters Using a Warped Cosine-Modulated Filter Bank. *Digital Signal Processing and Its Application: Reports of the XXVI International Conference, March 27–29, 2024*. Moscow, Russian Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications named after A. S. Popova. 71–76 (in Russian).
8. Gülzow T., Engelsberg A., Heute U. (1998) Comparison of a Discrete Wavelet Transformation and a Nonuniform Polyphase Filterbank Applied to Spectral-Subtraction Speech Enhancement. *Signal Processing*. 64 (1), 5–19.
9. Vashkevich M. I. (2021) Analysis of Rounding Errors When Implementing a Chain of Phase Links in Fixed-Point Arithmetic. *Digital Signal Processing*. (2), 12–18 (in Russian).
10. Vashkevich M. I., Azarov I. S. (2020) Comparison of Frequency-Time Transformations: Fourier Analysis, Wavelets and Filter Banks Based on Phase Transformation. *Digital Signal Processing*. (2), 13–26 (in Russian).
11. Roberts R. A., Mullis C. T. (1987) *Digital Signal Processing*. Boston, Addison-Wesley Publishing Co., Inc.

### Вклад авторов

Порхун М. И. разработал метод повышения скорости выполнения алгоритма фазового преобразования, провел экспериментальные исследования эффективности данного метода.

Вашкевич М. И. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, принимал участие в разработке метода повышения скорости выполнения алгоритма фазового преобразования, участвовал в интерпретации результатов эксперимента.

### Authors' contribution

Porhun M. I. developed a method for speed up the allpass transformation algorithm and conducted experimental studies on the effectiveness of this method.

Vashkevich M. I. defined the tasks that needed to be addressed during the research, participated in the development of the method for speed up the allpass transformation algorithm, and took part in interpreting the experimental results.

### Сведения об авторах

**Порхун М. И.**, магистр техн. наук, ст. преп. каф. электронных вычислительных средств, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

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

### Адрес для корреспонденции

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

### Information about the authors

**Porhun M. I.**, M. of Sci., Senior Lecturer at the Electronic Computing Facilities Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Vashkevich M. I.**, Dr. of Sci. (Tech.), Professor at the Electronic Computing Facilities Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-84-20  
E-mail: porhun@bsuir.by  
Porhun Maxim Igorevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-80-88>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 004.832, 519.6

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНО-АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В КРИПТОСИСТЕМАХ

А. Ф. ЧЕРНЯВСКИЙ<sup>1</sup>, Е. И. КОЗЛОВА<sup>1</sup>, Ю. А. ЧЕРНЯВСКИЙ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 30.04.2024

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

**Аннотация.** Рассмотрены виды, функции и некоторые особенности криптосистем, а также схемотехнические варианты расширения их функциональных возможностей. Представлены варианты формирования ключей и шифров, используемых в криптосистемах с типовой структурной организацией, и технологии создания цепочек шифрования. Описана схема шифрования, в рекуррентной формуле алгоритма которой задействованы предыдущие блоки как шифрования, так и открытого текста. Данная схема надежно защищает от любой несанкционированной модификации зашифрованного текста. Приведены структурные схемы организации криптосистем симметричного и асимметричного типов. Предложен вариант реализации декодирующей процедуры в пороговом МИМА-криптомодуле разделения секрета с маскирующим преобразованием, в котором минимизируются необходимые временные и аппаратные затраты на выполнение процедуры реконструкции секрет-оригинала. Представленный материал может быть частью исходных разделов необходимого и достаточно обеспеченного в математическом плане учебного пособия по основам и современным проблемам криптографии.

**Ключевые слова:** криптосистема, шифр, ключ, хеш-функция, генератор случайных чисел, минимально избыточное модулярное кодирование, криптостойкость, преобразование, транспортное кодирование, МИМА-криптомодуль.

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

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Цифровые и космические технологии, безопасность общества и государства» (подпрограмма «Цифровые технологии и космическая информатика», задание 5.1.6.3).

**Для цитирования.** Чернявский, А. Ф. Особенности структурно-аппаратного обеспечения преобразования информации в криптосистемах / А. Ф. Чернявский, Е. И. Козлова, Ю. А. Чернявский // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 80–88. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-80-88>.

## FEATURES OF STRUCTURAL HARDWARE TRANSFORMATION OF INFORMATION IN CRYPTOSYSTEMS

ALEXANDER F. CHERNYAVSKIY<sup>1</sup>, ELENA I. KOZLOVA<sup>1</sup>, YURI A. CHERNYAVSKIY<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 30.04.2024

**Abstract.** The article considers types, functions and some features of cryptosystems, as well as circuit design options for expanding their functionality. Options for generating keys and ciphers used in cryptosystems with a typical structural organization, and technologies for creating encryption chains are presented. An encryption scheme is described, in the recurrent formula of the algorithm of which the previous blocks of both encryption and plaintext are used. This scheme reliably protects against any unauthorized modification of the encrypted text. Structural diagrams of the organization of symmetric and asymmetric cryptosystems are given. A variant of implementing a decoding procedure in a threshold MIMA cryptomodule for sharing a secret with a masking transformation is proposed, in which the necessary time and hardware costs for performing the procedure of reconstructing the original secret are minimized. The presented material can be the part of the original sections of a necessary and sufficiently provided in mathematical terms textbook on the basics and modern problems of cryptography.

**Keywords:** cryptosystem, cipher, key, hash function, random number generator, minimum redundant modular coding, cryptographic strength, conversion, transport coding, MIMA cryptomodule.

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

**Gratitude.** This work was carried out in the frames of the State Programme of Scientific Research “Digital and Space Technologies, Security of Society and the State” (Subprogramme “Digital Technologies and Space Informatics”, assignment 5.1.6.3).

**For citation.** Chernyavskiy A. F., Kozlova E. I., Chernyavskiy Yu. A. (2024) Features of Structural Hardware Transformation of Information in Cryptosystems. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 80–88. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-80-88> (in Russian).

### Введение

Криптосистема – это система, представляющая собой программно-аппаратный комплекс, объединяющий в единое целое набор криптосхем, шифров и средств обеспечения оперативного криптографического преобразования информации [1]. Методы и средства криптографического преобразования информации изучаются в криптографии, а проблемы практической стойкости шифров – в криптоанализе. Криптография и криптоанализ развиваются параллельно. Криптографы всегда пытаются создать такую криптосистему, которая была бы стойкой ко всем известным методам криптоанализа. Исследованием совместного применения методов криптографии и криптоанализа занимается криптология.

В основу любой криптосистемы положен шифр. К криптосистемам с типовой структурной организацией относят системы, основанные на симметричных и асимметричных алгоритмах шифрования. По типам схем обработки потоков информации симметричные криптосистемы делятся на поточные и блочные, а асимметричные – на двухключевые и алгоритмы электронной цифровой подписи (ЭЦП). Существенную значимость для криптосистем имеют алгоритмы формирования временной последовательности с блочной схемой разбиения, при которой длина каждого блока соответствует интервалу шифрования. При этом криптопреобразование над каждым блоком осуществляется независимо.

Простейший вариант формирования последовательности интервалов шифрования недостаточно устойчив к таким известным методам криптоанализа, как «атака на основе известного открытого текста» и «атака на основе выбранного открытого текста», что не позволяет широко его использовать в криптосистемах. В настоящее время данный метод шифрования существенно модернизирован.

Современные криптосистемы обладают специальной функцией защиты от внешних атак, позволяющей обнаружить несанкционированные изменения информации посредством осуществления программно-аппаратного контроля за параметрами информационных потоков как в преде-

лах криптосистемы, так и напрямую с ней не связанных. Стойкость современных криптосистем обусловлена устойчивостью их алгоритмов к применению методов криптоанализа (криптостойкостью) и конфиденциальностью относительно небольшого блока информации, называемой секретным ключом.

Изложенный в статье материал может быть частью исходных разделов необходимого и достаточно обеспеченного в математическом плане учебного пособия по проблемам криптографии «Особенности структурного и аппаратного обеспечения криптографического преобразования информации в криптосистемах».

### Варианты ключей, используемых в криптосистемах с типовой структурной организацией

Если алгоритм шифрования является долгосрочным и устойчивым элементом криптосистемы, то ключ используется для управления процессом криптографического преобразования (шифрования) и является легко сменяемым элементом криптосистемы. Мастер-ключ формируется системой управления или пользователем из парольной фразы. Ключ сеанса генерируется системой управления для шифрования каждого нового сообщения на основе использования последовательности случайных или псевдослучайных чисел. Ключ сеанса шифруется мастер-ключом пользователя и помещается в заголовок сообщения.

На сегодняшний день разработаны как простые, так и относительно сложные схемы создания ключа [1]. В простых схемах ключ может сформировать самостоятельно отправитель сообщения, в более сложных – ключ формируется автоматически программным обеспечением, либо запрашивается у базы данных ключей. Ввиду того, что ключ представляет собой большую последовательность целых чисел, которую трудно запомнить обычному человеку, пользователю предлагается вводить пароль – конкретную заданную последовательность, состоящую, например, из текста, символов и цифр.

Ключ каждого сеанса используется для шифрования только одного сообщения, поэтому при получении злоумышленником значения такого ключа нарушается конфиденциальность лишь одного сообщения. Таким образом обеспечивается дополнительная криптостойкость системы и исключается необходимость обмениваться мастер-ключом по защищенному каналу.

### Технология обработки потоков информации

По технологии обработки потоков информации симметричные криптоалгоритмы подразделяются на поточные и блочные шифры. Поточный шифр обрабатывает информацию побитно и применяется прежде всего тогда, когда информацию невозможно разбить на блоки (например – потоковое видео). В блочных шифрах для обработки информация делится на блоки заданного объема (64, 128, 256 или 512 бит). Асимметричные криптоалгоритмы всегда являются блочными. Для криптосистем, основанных на блочных криптоалгоритмах, могут применяться две различные технологии обработки потоков информации.

Простейшая схема блочного шифрования позволяет из текста ( $M$ ) произвольной длины сформировать блоки ( $M_i$ ), которые затем шифруются (*Encrypt*) независимо друг от друга, при этом длина формируемого блочного шифра ( $C_i$ ) равняется длине шифруемого участка сообщения, как показано на рис. 1.

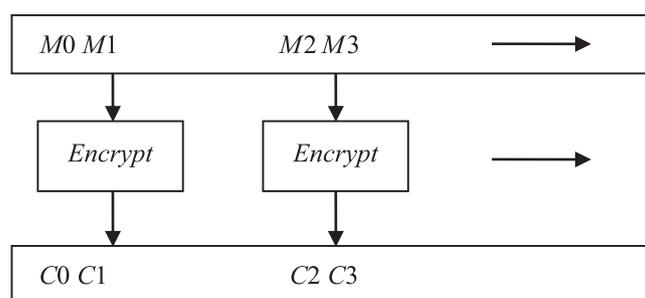


Рис. 1. Простейшая схема шифрования  
Fig. 1. Simplest encryption scheme

Существенный недостаток данной схемы обусловлен тем, что при шифровании двух одинаковых блоков на выходе формируются два идентичных блока шифрованного текста. Наличие указанного недостатка создает уязвимость с точки зрения возможности модификации шифрованного текста. Недостаток устраняется относительно простой модификацией такой схемы путем применения схемы шифрования «со сцеплением блоков». Благодаря введению рекуррентной формулы в схеме шифрования «со сцеплением блоков» результат шифрования текущего блока данных будет зависеть от значения предыдущего блока, связывая таким образом воедино весь документ. Как показано на рис. 2, текущий блок  $M1$  открытого текста инициирует операцию «исключающее ИЛИ» ( $XOR$ ) на шифротекст предыдущего блока  $C0$  и только потом производится его шифрование. Таким образом при искажении одного блока шифротекста полностью повреждаются модифицированные измененные биты в схеме блока. Эта схема достаточно надежно защищает от модификации зашифрованного потока [1].

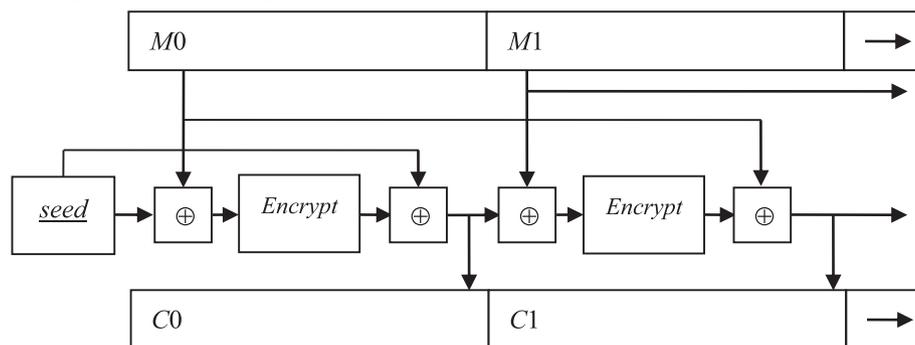


Рис. 2. Схема шифрования «со сцеплением блоков»:

$\oplus$  –  $XOR$  («исключающее ИЛИ»); *seed* – генератор случайных чисел

Fig. 2. Block chaining encryption scheme:  $\oplus$  –  $XOR$  (“exclusive OR”); *seed* – random number generator

### Структурная организация криптосистем

Все криптоалгоритмы с ключом подразделяются на симметричные и асимметричные. При симметричном шифровании используется один и тот же ключ ( $K_c$ ), называемый секретным ключом, как для шифрования, так и для дешифрования информации. Для данных схем также допускается различие ключей для шифрования и дешифрования при условии существования криптоалгоритма их взаимного вычисления. Секретный ключ не должен быть известен никому, кроме отправителя и получателя сообщения, поскольку позволяет получить полный доступ к информации, содержащейся в шифрограмме. Алгоритмы симметричных криптосхем должны быть практически стойкими, чтобы исключить наличие слабых мест, для которых прослеживается взаимосвязь между незашифрованным и зашифрованным сообщениями, а также не позволяют узнать ключ по множеству пар (зашифрованное сообщение – незашифрованное сообщение).

В асимметричном варианте при применении криптосхемы для шифрования сообщения (идентификации лица, подписавшего документ, в случае выработки ЭЦП ( $K_s$ )) применяется один ключ ( $K_o$ ), а для дешифрования (аутентификации лица, подписавшего документ, в случае выработки ЭЦП ( $K_o$ )) – другой ( $K_s$ ). Процедура шифрования в асимметричных системах реализуется таким образом, чтобы злоумышленник не смог восстановить исходный текст, даже зная зашифрованный текст  $C$  и открытый ключ шифрования  $K_o$ . Такие криптосистемы закрывают возможность осуществления злоумышленником попыток выяснить либо исходный текст  $M$ , либо закрытый ключ шифрования  $K_s$  по определенному, достаточно большому объему зашифрованных данных  $C$ , а также узнать закрытый ключ шифрования  $K_s$  по известному исходному  $M_i$ , соответствующему зашифрованному тексту  $C_i$  и открытому ключу  $K_o$ .

В состав криптосистем входят схемы шифрования и управления ключами. Схема шифрования, как правило, включает в себя алгоритм первоначального преобразования, в том числе алгоритм сжатия, непосредственно алгоритм шифрования, алгоритм заключительной перестановки и схему транспортного кодирования. Схема управления ключами в большинстве случаев включает в себя алгоритм преобразования парольной фразы в мастер-ключ, алгоритм вычисления хеш-функции ключа, генератор случайных чисел, систему управления цифровыми сертификата-

ми и алгоритм выработки ключа сеанса. Общая структура криптосистемы симметричного типа представлена на рис. 3 (где ГСЧ – генератор случайных чисел) [2].

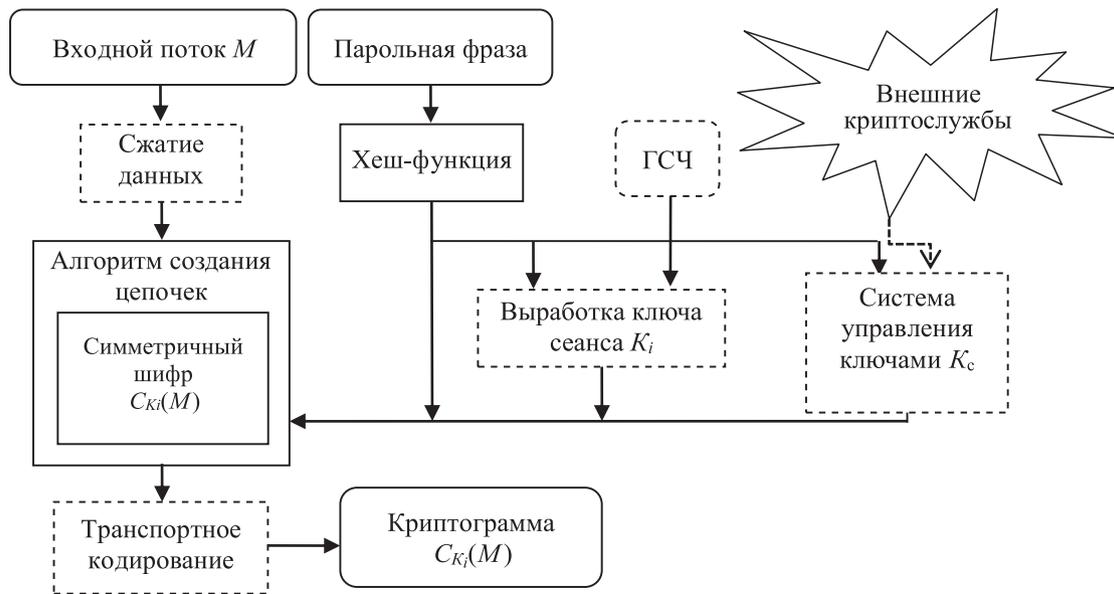


Рис. 3. Структура криптосистемы симметричного типа  
Fig. 3. Structure of a symmetric type cryptosystem

Асимметричные криптосистемы в качестве своего основного элемента используют алгоритмы шифрования на открытом ключе. По своей криптостойкости они сравнимы с симметричными алгоритмами, однако, ввиду особенности функционирования самого процесса шифрования, быстрдействие у асимметричных алгоритмов существенно ниже. В силу этого свойства они находят применение в схемах, где необходимо надежно зашифровать блоки данных небольших размеров, например, хеш-функцию документа при его подписании ЭЦП, либо ключ сеанса для алгоритма симметрического шифрования, как представлено на рис. 4 [2].

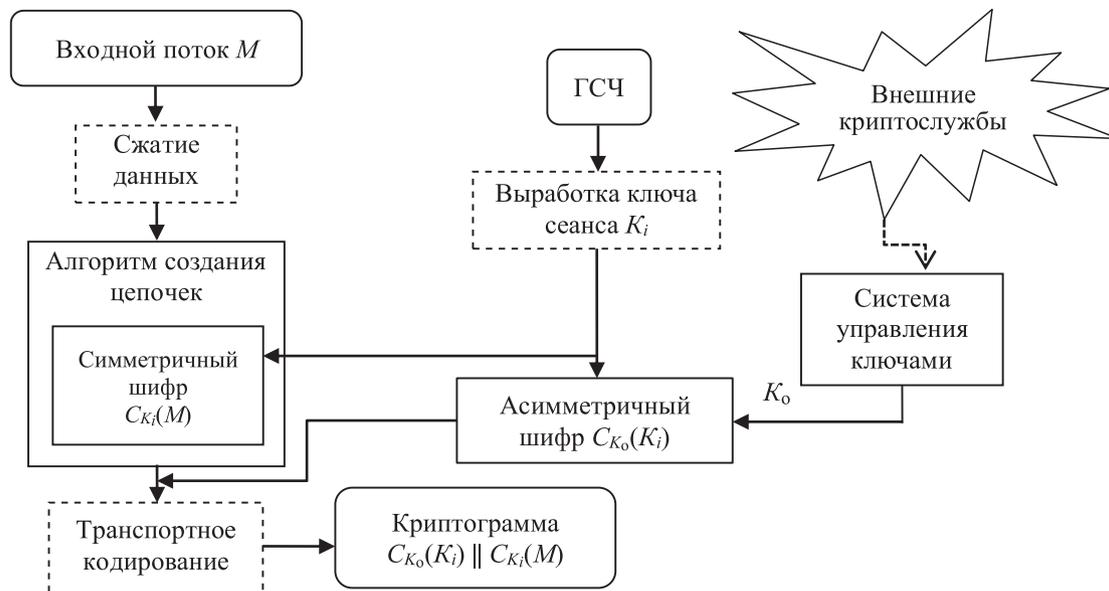


Рис. 4. Структура криптосистемы асимметричного типа  
Fig. 4. Structure of an asymmetric type cryptosystem

В случае применения асимметричной криптосистемы текст сообщения  $M$  шифруется блочным шифром с использованием ключей сеанса. Открытым ключом  $K_o$  шифруется только ключ сеанса  $K_i$ , формируемый передающей стороной. Сообщение в целом состоит из зашифрованного

ключа сеанса  $C_{K_0}(K_i)$  и собственно основной шифрограммы  $C_{K_i}(M)$ . После завершения шифрования, как и в любой другой криптосхеме, ключ сеанса уничтожается, а криптограмма отправляется получателю. На приемной стороне с помощью закрытого ключа дешифруется ключ сеанса, а затем уже и само сообщение [2].

Назначение блока «транспортное кодирование» на выходе – превращать исходный поток сигналов в поток большего объема, состоящий только из печатных символов ASCII. Такой блок необходим вследствие того, что во многих случаях криптосистемы являются прозрачной прослойкой систем передачи данных. Например, если система проектировалась для передачи текстовых сообщений по электронной почте, то соглашение, формируемое при встраивании криптопрослоек, не должно нарушать исходного разрешенного набора символов.

Способная необратимо изменять данные хеш-функция получила широкое распространение в алгоритмах быстрого поиска информации. В настоящее время она ничуть не в меньшей мере используется в криптографии. Вычисление «неподделываемых» контрольных сумм документов  $HASH(M)$  является основным, но не единственным назначением хеш-функции в криптографии.

При использовании алгоритма хеширования в условиях невозможности подобрать иной документ с той же хеш-суммой и два документа  $M1$  и  $M2$  с произвольной одинаковой хеш-суммой  $HASH(M1) = HASH(M2)$  хеш-сумма становится уникальной характеристикой документа. Именно такое свойство позволило свести проблему защиты большого блока данных к решению задачи защиты маленького блока данных заранее известной длины, что нашло широкое применение в алгоритмах формирования ЭЦП.

В системах электронной цифровой подписи ключи асимметричных алгоритмов применяются в обратном порядке. На стороне лица, подписывающего документ (отправителя), закрытым ключом отправителя  $K_3$  шифруется не сам электронный документ  $M$ , а только его хеш-сумма  $HASH(M)$ . Документ  $M$  в открытом виде и зашифрованное значение хеш-суммы  $C_{K_3}(HASH(M))$  отправляют получателю. Получатель на своей стороне проверяет ЭЦП путем самостоятельного вычисления значения хеш-суммы и сверки его со значением хеш, извлеченным из ЭЦП и расшифрованным с помощью открытого ключа отправителя  $K_0$ . При совпадении значений хеш-сумм весь документ признается целостным и аутентичным.

Случайные числа применяются при создании ключей сеанса симметричных схем и закрытых ключей асимметричных схем, при подписании документов и в схемах разделения секрета. Криптографические алгоритмы генерации псевдослучайных чисел установлены СТБ 34.101.47–2017. Алгоритмы стандарта могут применяться для построения ключей, синхропосылок, одноразовых паролей, других непредсказуемых или уникальных параметров криптографических алгоритмов и протоколов [3].

ГСЧ создаются либо на основе использования информации из физических процессов, либо из самой ЭВМ. Фотоприемники, работающие в режиме одноквантовой регистрации, детекторы событий ионизирующей радиации, высокоточные измерители теплового шума полупроводниковых устройств или космическое излучение – основные устройства либо источники, используемые для этих целей. На современных компьютерах генерация случайных чисел затруднительна, поскольку компьютеры по своей конструкции являются детерминированными системами. С учетом этого проблема генерации случайной последовательности с произвольным законом распределения вероятностей сводится к задаче генерации равномерно распределенной случайной последовательности (РРСП). Стойкость криптосистем во многом определяется уровнем соответствия модели РРСП применяемых в таких системах псевдослучайных последовательностей, поэтому важно оценивать этот уровень с помощью универсального алгоритма тестирования случайных и псевдослучайных последовательностей [1].

Генераторы РРСП – устройства, позволяющие по запросу получать некоторую случайную последовательность чисел  $(x_1, \dots, x_n) \in A$  длиной  $n \in \mathbb{N}$ , элементы которой  $x_1, \dots, x_n$  называются случайными числами и распределены по равномерному закону. Существуют табличный, физический и программный генераторы РРСП. Программные генераторы РРСП наиболее известны.

Итак, РРСП – это случайная последовательность  $x_1, \dots, x_n, x_{n+1} \dots$  со значениями в дискретном множестве  $A$ , определенная на вероятностном пространстве  $(\Omega, F, P)$  и удовлетворяющая следующим свойствам [1]:

- для любого  $n \in \mathbb{N}$  и произвольных значений индексов  $1 \leq (t_1 < \dots < t_n)$  случайные величины  $(x_{t_1}, \dots, x_{t_n}) \in A$  независимы в совокупности;
- для любого номера  $t \in \mathbb{N}$  случайная величина  $x_t$  является бернуллиевой и имеет дискретное, равномерное на  $A$  распределение вероятностей:

$$P(X_t = l) = 1/2, i \in V = \{0, 1\}.$$

В современных криптосистемах широко используются равномерно распределенные случайные последовательности или имитирующие их псевдослучайные последовательности. Для программирования обычно применяются псевдослучайные числа, полученные детерминированным алгоритмом из некоторого начального значения *seed*. Последовательность  $\{x_i\}$  называется псевдослучайной, когда она вычисляется по некоторому известному детерминированному соотношению и обладает статистическими свойствами, схожими с РРСП. Поскольку стойкость криптосистем во многом определяется уровнем соответствия модели РРСП и используемых последовательностей  $x_i \in A$  ( $t = 1, 2, \dots$ ), важно на практике оценивать этот уровень. В [1] предложен универсальный алгоритм тестирования случайных и псевдослучайных последовательностей.

### **Реализация декодирующей процедуры в пороговом криптомодуле разделения секрета с маскирующим преобразованием, основанным на базе избыточных модулярных вычислительных структур**

Применяемая технология управления криптографическими ключами выполняет особую роль при решении актуальной задачи обеспечения необходимого уровня безопасности при хранении, обработке и передаче данных. В качестве компьютерно-арифметической основы для криптографических приложений рассматриваемого класса целесообразно принять модулярную арифметику – арифметику модулярных систем счисления (МСС). Фундаментальные преимущества МСС наиболее полно удастся реализовать в рамках так называемого минимально избыточного кодирования [4, 5].

Введение в модулярный код минимальной избыточности существенно упрощает расчет интервально-индексных характеристик и связанных с ними форм представления целого числа при реализации ряда немодульных операций [6]. Отмеченное обстоятельство обуславливает целесообразность использования минимально избыточной модулярной арифметики (МИМА) в решении задач преобразования информации в криптосистемах. Приведенные в [7] исследования привели к формированию принципиально новой основы для создания пороговых криптосхем разделения секрета с применением минимально избыточного модулярного кодирования.

Наиболее перспективными технологиями, расширяющими функциональные возможности криптосхем и повышающими их устойчивость к применению методов криптоанализа, считаются технологии так называемой активной безопасности. Такие технологии предусматривают периодическое обновление ключей, одноразовых паролей и пространственное разделение секрета. Пространственное разделение секрета между  $n$  абонентами с возможностью его восстановления по компонентам любого абонента ( $2 \leq t \leq l \leq n$ ;  $t$  – пороговое число абонентов) обеспечивается решающим правилом, реализуемым  $(t, n)$  – пороговой системой. Концептуальную базу  $(t, n)$  – пороговой МИМА-схемы разделения секрета, которая рассчитана на полное число  $n$  и пороговое число  $t$  абонентов распределенной системы, составляют следующие определяющие положения [7]:

1) исходный секрет, разделяемый  $n$  сторонами, представляет собой целое число  $S \in Z_p$ , где  $p$  – большой модуль, взаимно простой с  $p_1, p_2, \dots, p_n$ ;

2) над  $S$  в МСС с базисом  $P$  выполняется маскирующее преобразование вида  $\hat{S} = S + C_p$  ( $C_p$  – псевдослучайная целочисленная величина). Цифровые значения  $\tilde{\sigma}_i = \left| \hat{S} \right|_{p_i} = \left| \sigma_i + \left| C_p \right|_{p_i} \right|_{p_i}$ ;  $\sigma_i = \left| S \right|_{p_i}$ ;  $i = \overline{1, n}$ , получаемого кода  $(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$  рассматриваются как долевые (частичные) секреты, принадлежащие одноименным абонентам;

3) любые  $t$  или более абонентов могут восстановить секрет-оригинал  $S$  по принадлежащим им маскирующим частичным секретам. Но никакая группа абонентов числом менее  $t$  сделать этого не может;

4) область (диапазон) изменения маскирующего секрета  $\tilde{S}$  согласуется с принципом минимально избыточного модулярного кодирования, что обеспечивает возможность выполнения декодирующей операции (операции восстановления секрета-оригинала) по упрощенным МИМА-процедурам.

Реконструкция секрет-оригинала группой абонентов численностью  $k < t$  невозможна. Исходный и долевыми секреты представляют собой большие целые числа. В связи с этим эффективность выполняемых в пороговых криптосистемах преобразований определяется свойствами используемой технологии перевода реализуемых вычислений из диапазонов больших чисел в диапазоны целых чисел стандартной разрядности. Наиболее трудоемкой операцией в пороговых криптосистемах рассматриваемого типа является реконструкция секрета-оригинала по модулярным кодам маскирующего аналога. В [8] представлен метод выполнения декодирующей операции в пороговом криптомодуле разделения секрета. Его основой также является МИМА. Фундаментальные преимущества МСС наиболее полно реализуются в рамках применения минимально избыточного модулярного кодирования и ассоциированной с ним интервально-модулярной формой представления чисел. В этом варианте минимизируются необходимые временные и аппаратные затраты на выполнение процедуры реконструкции секрет-оригинала.

### Заключение

1. Представлена схема шифрования, в рекуррентной формуле алгоритма которой задействован не только предыдущий блок шифрования, но и предыдущий открытый блок. Эта схема надежно защищает от любой несанкционированной модификации зашифрованного текста.

2. Обозначены ограничения на диапазон изменения маскирующего аналога секрет-оригинала, обеспечивающие возможность применения минимально избыточной модулярной арифметики в пороговой схеме рассматриваемого класса без снижения ее криптостойкости [8].

3. Разработана концептуальная база  $(t, n)$  пороговой минимально избыточной модулярной арифметики – схемы разделения секрета, которая рассчитана на полное число абонентов  $n$  и пороговое число  $t$ .

### Список литературы

1. Харин, Ю. С. Математические и компьютерные основы криптологии / Ю. С. Харин. Минск: Новое знание, 2003.
2. Конев, И. Р. Информационная безопасность предприятия / И. Р. Конев, А. В. Беляев. СПб.: БХВ-Петербург, 2003.
3. Информационные технологии и безопасность. Криптографические алгоритмы генерации псевдослучайных чисел: СТБ 34.101.47–2017.
4. Чернявский, А. Ф. Особенности машинной арифметики высокопроизводительных модулярных вычислительных структур / А. Ф. Чернявский, Е. И. Козлова, А. А. Коляда // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. 2023. № 2. С. 94–101.
5. Червяков, Н. И. Модулярная арифметика и ее приложения в инфокоммуникационных технологиях / Н. И. Червяков, А. А. Коляда, П. А. Ляхов. М.: Физматлит, 2017.
6. Коляда, А. А. Модулярная интерпретация сообщений в системах защиты информации / А. А. Коляда, С. Ю. Протасеня, Н. И. Червяков // Инфокоммуникационные технологии. 2015. Т. 13, № 3. С. 245–252.
7. Коляда, А. А. Пороговый метод разделения секрета на базе избыточных модулярных вычислительных структур / А. А. Коляда, П. В. Кучинский, Н. И. Червяков // Информационные технологии. 2019. Т. 25, № 9. С. 553–561.
8. Чернявский, А. Ф. Метод деления на двоичную экспоненту для выполнения декодирующей операции в пороговом мини-криптомодуле разделения секрета в маскирующем преобразовании / А. Ф. Чернявский, А. А. Коляда, С. Ф. Протасеня // Теоретическая и прикладная криптография: матер. Междунар. науч. конф. Минск: Белор. гос. ун-т, 2020. С. 99–104.

### References

1. Kharin Yu. S. (2003) *Mathematical and Computer Foundations of Cryptology*. Minsk, Novoe Znanie Publ. (in Russian).
2. Konev I. R., Belyaev A. V. (2003) *Information Security of an Enterprise*. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ. (in Russian).

3. State Standard of the Republic of Belarus STB 34.101.47–2017. *Information Technology and Security. Cryptographic Algorithms for Generating Pseudorandom Numbers* (in Russian).
4. Chernyavsky A. F., Kozlova E. I., Kolyada A. A. (2023) Features of Machine Arithmetic of High-Performance Modular Computing Structures. *Journal of the Belarusian State University. Mathematics. Computer Science.* (2), 94–101 (in Russian).
5. Chervyakov N. I., Kolyada A. A., Lyakhov P. A. (2017) *Modular Arithmetic and Its Applications in Infocommunication Technologies*. Moscow, Fizmatlit Publ. (in Russian).
6. Kolyada A. A., Protasenyia S. Yu., Chervyakov N. I. (2015) Modular Interpretation of Messages in Information Security Systems. *Infocommunication Technologies.* 13 (3), 245–252 (in Russian).
7. Kolyada A. A., Kuchinsky P. V., Chervyakov N. I. (2019) Threshold Method of Secret Sharing Based on Redundant Modular Computing Structures. *Information Technologies.* 25 (9), 553–561 (in Russian).
8. Chernyavsky A. F., Kolyada A. A., Protasenyia S. F. (2020) Method of Division by Binary Exponent for Performing a Decoding Operation in a Threshold Mini-Cryptomodule for Sharing a Secret in a Masking Transformation. *Theoretical and Applied Cryptography: Proceedings of the International Scientific Conference*. Minsk, Belarusian State University. 99–104 (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**

**Чернявский А. Ф.**, д-р техн. наук, акад. Нац. акад. наук Беларуси, проф., проф. каф. интеллектуальных систем, Белорусский государственный университет (БГУ)

**Козлова Е. И.**, канд. физ.-мат. наук, доц., зав. каф. интеллектуальных систем, БГУ

**Чернявский Ю. А.**, канд. техн. наук, доц., доц. каф. информатики, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

#### **Адрес для корреспонденции**

220030, Республика Беларусь,  
г. Минск, просп. Независимости, 4  
Белорусский государственный университет  
Тел.: +375 17 209-58-36  
E-mail: kozlova@bsu.by  
Козлова Елена Ивановна

#### **Information about the authors**

**Chernyavskiy A. F.**, Dr. of Sci. (Tech.), Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Professor at the Department of Intelligent Systems, Belarusian State University (BSU)

**Kozlova E. I.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Intelligent Systems Department, BSU

**Chernyavskiy Yu. A.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Informatics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

#### **Address for correspondence**

220030, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosti Ave, 4  
Belarusian State University  
Tel.: +375 17 209-58-36  
E-mail: kozlova@bsu.by  
Kozlova Elena Ivanovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-89-94>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 004.3+697.7

## АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

В. А. РЫБАК<sup>1</sup>, И. М. РИМАРЕВ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Белорусская государственная академия связи (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 08.08.2024

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

**Аннотация.** Сегодня актуальными являются вопросы перевода частных домовладений на независимые источники энергии, включая солнечные панели и гелиоколлекторы. В статье рассматриваются варианты программного обеспечения аппаратных комплексов, с помощью которых можно управлять системами обеспечения энергией частных домов. Представлены технологии использования независимых источников энергии в системе энергопотребления, а также математическая модель их оптимизации для удаленных загородных домов.

**Ключевые слова:** солнечные панели, гелиоколлекторы, аккумуляция электроэнергии, аппаратно-программный комплекс, система управления.

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

**Для цитирования.** Рыбак, В. А. Аппаратно-программный комплекс управления энергетическими установками / В. А. Рыбак, И. М. Римарев // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 89–94. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-89-94>.

## HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR POWER PLANT MANAGEMENT

VICTOR A. RYBAK<sup>1</sup>, IGORY M. RIMAREV<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Belarusian State Academy of Communications (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 08.08.2024

**Abstract.** Today, the issues of transferring private households to independent energy sources, including solar panels and solar collectors, are relevant. The article examines software options for hardware systems that can be used to manage energy supply systems for private homes. Technologies for using independent energy sources in the energy consumption system are presented, as well as the mathematical model for their optimization for remote country houses.

**Keywords:** solar panels, solar collectors, energy storage, hardware and software complex, control system.

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

**For citation.** Rybak V. A., Rimarev I. M. (2024) Hardware and Software Complex for Power Plant Management. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 89–94. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-80-85> (in Russian).

## Введение

В настоящее время уделяется большое внимание вопросам зеленой экономики, что оказывает влияние на технические решения систем энергообеспечения. Сегодня на рынке представлен широкий спектр вариантов программного обеспечения аппаратных комплексов, с помощью которых можно управлять системами обеспечения энергией частных домов. Некоторые разработчики предоставляют бесплатные пробные версии, чтобы можно было получить практический опыт работы с программным обеспечением [1, 2].

Цель исследований авторов – проектирование аппаратно-программного комплекса (АПК) управления режимами работы солнечных панелей с возможностью переключения режимов гелиоколлекторов, а также изучение возможности аккумуляции электроэнергии в гелиоколлекторе. Представлены сравнительный анализ передовых АПК и их оптимальное внедрение в частные домовладения.

## Результаты исследований и их обсуждение

Солнечная электростанция коммунального масштаба может состоять из множества солнечных коллекторов. Для достижения высокой энергоэффективности операторам предприятий необходимо собирать и обрабатывать данные с многочисленных устройств, расположенных на удаленных объектах. Когда речь идет о централизованной работе контролируемых систем, важной характеристикой АПК является встроенный периферийный компьютер промышленного уровня для удаленного мониторинга, сбора, регистрации и преобразования протоколов данных. Кроме того, важны такие характеристики, как:

- низкое энергопотребление для максимизации электрической мощности солнечной электростанции;
- надежная работа в условиях наружной установки при высоких температурах;
- удаленный веб-мониторинг производительности солнечных батарей, нагрузки на аккумулятор и данные об окружающей среде от датчиков.

Перечисленные характеристики важны и для частного домовладения. Так, многие установщики предлагают внедрение программного обеспечения (ПО), которое позволит работать с поставщиками энергии не только в рамках контроля и удаленного мониторинга, но и в системе индивидуального управления и регулирования АПК энергетическими установками. В табл. 1 представлены некоторые АПК управления энергетическими установками, существующие на рынке.

**Таблица 1.** Аппаратно-программные комплексы управления энергетическими установками [2, 3]

**Table 1.** Hardware and software complex for controlling power plants [2, 3]

Название АПК	Функция	Плюсы	Минусы
MOXA	Мониторинг и управление солнечной электростанцией, рассчитанной как на отдельное жилое помещение, так и на многоэтажный жилой дом	Наличие программного решения ThingsPro для сбора данных Modbus и преобразования протокола Modbus в MQTT позволяет контролировать яркость, работу подачи и распределения энергии, ее накопления в разные времена года, управлять инвертором удаленно	Электростанция коммунального масштаба будет контролироваться удаленно фирмой-поставщиком
DeltaSol и ее версии	Подача энергии для освещения и обогрева помещений	Меню содержит ясные и однозначные указания по эксплуатации АПК. Разнообразные датчики позволяют поворачивать панели, обращать их в нужную сторону как в рамках запрограммированной системы, так и вручную	Установка требует вмешательства специалистов, что связано с большим количеством датчиков и аксессуаров, их вводом в работу и последующей эксплуатацией. Такое сложное устройство потребует регулярного взаимодействия с компанией-установщиком

Окончание табл. 1  
Ending of Tab. 1

Название АПК	Функция	Плюсы	Минусы
Oracle Utilities	Распределение системы АПК энергетических установок, предупреждение сбоев и аналитика данных	Наличие нескольких протоколов работы с клиентами, возможность реализации сложных задач передачи и обработки данных, экстренного реагирования и управления активами. Работает в режиме онлайн и локально	Визуальное предоставление отчета о неполадках доступно только устанавливающей компании
Retgen	Имеет разнообразную аналитику, что расширяет возможности профилактического обслуживания и полной интеграции с устройствами ИИ или ВЧ, что зависит от выбранной конфигурации	Для управления солнечными установками становится бесценным инструментом, так как позволяет использовать весь потенциал своих активов. Работа на ИИ позволяет электростанциям принимать решения на основе данных и способствовать развитию культуры постоянного совершенствования	Больше подходит для коммунальных систем, но при регулярном сотрудничестве с технической службой возможно внедрение в частное домовладение
«ЭкоСтруктура»	Управление системой распределения энергии, накопленной, возобновленной, полученной из того или иного источника	Простое устройство системы сборки, установки и последующего сообщения с пользователями и контролирующими фирмами	Гибкая система, но больше подходит для крупных коммунальных систем
МПК H02J 3/32	Автоматическая ориентация панелей и батарей, накапливающих энергию от естественных источников (солнца)	Компактный комплекс, предоставляет максимальные мощности и возможности по получению энергии в разные времена года и время суток	Устаревшая версия (2006 г.), из-за чего процесс вращения осуществляется благодаря вспомогательным системам и устройствам, что делает его энергозатратным
RU 216282 U1	Поддерживает ориентацию солнечных панелей, их передвижение (вращение), оптимальное накопление энергии и ее распределение (введен в эксплуатацию в 2023 г.)	Хорошо применим к автономным, частным домовладениям, позволяет эффективно использовать энергоресурсы, распределять, накапливать и экономить в разные сезоны и разное время суток	Сложное техническое устройство

Режимы работы гелиоколлекторов, возможность аккумуляции электроэнергии ими являются значимыми в процессе автоматизации. Многое также зависит от выбора клиента и климатических условий, поскольку солнечные коллекторы разнообразны по способам использования (рис. 1).

Как видно из представленных на рис. 1 данных, оптимальным решением для частного домовладения являются трубчатые вакуумные коллекторы, которые будут работать в рамках системы RU 216282 U1. Но в систему АПК необходимо внести ряд данных для произведения расчетов, которые лягут в основу контроля движения и эффективности работы солнечных систем сбора и распределения энергии. В частности, для того, чтобы программа понимала, что необходимо изменять место ориентации, в алгоритм работы следует занести данные об отклонениях в температуре, о временных промежутках светового дня, а также о необходимости охлаждения самой панели и вентиляции составных элементов [1, 4, 5].

### ВИДЫ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ



Рис. 1. Виды современных гелиоколлекторов [6, 7]

Fig. 1. Solar collectors [6, 7]

Для управления работой спроектированного комплекса предлагается использовать следующую формулу:

$$u(t) = \frac{K_p}{\text{csc } e(t)} + \frac{K_i}{\text{csc} / \ln 0 \rightarrow t} e(t) dt + \frac{K_d}{\text{csc} / \text{frac} \{ de(t) | dt \}'}, \quad (1)$$

где  $u(t)$  – выходной сигнал управления в момент времени  $t$ ;  $K_p$  – пропорциональный результат, полученный автоматически при соотношении данных, заданных перед запуском аппарата;  $K_i$  – интегральный член, выполняющий функцию обработки внешнего/входного сигнала;  $K_d$  – производная, показывающая, что получилось при сопоставлении новых данных, когда были внесены изменения в соответствии с внешними и входными данными;  $e(t)$  – показатель, выдающий наличие ошибки между желаемой и измеренной температурой в конкретный момент времени  $t$ .

Последующее управление на основе накопленной ошибки с течением времени осуществляется запущенным алгоритмом, так как полученные данные запускают процесс либо оборота, либо охлаждения, либо накопления поступающей энергии. Коэффициенты усиления  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  в (1) определяются путем настройки для достижения оптимальных характеристик управления для конкретной системы солнечных батарей. Процесс настройки включает в себя регулировку коэффициентов усиления для минимизации временных затрат на установление и настройку на обнаруженную ошибку. Выбор оптимального оборудования для конкретного климата будет играть определяющую роль в работе всей системы. Как только вся информация обработана, начинается процесс работы АПК, представленный на рис. 2.

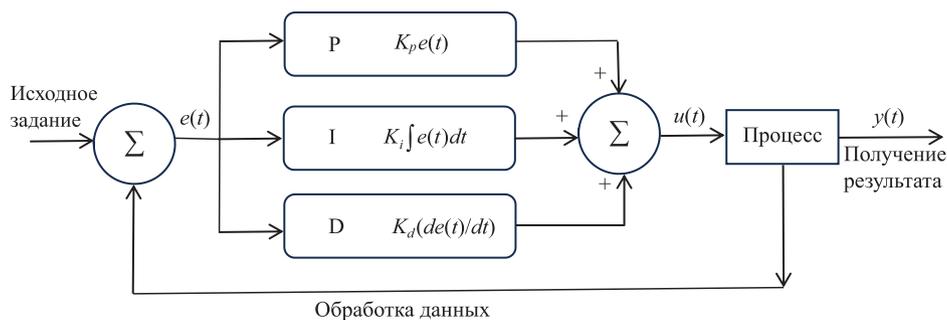


Рис. 2. Схема работы аппаратно-программного комплекса управления энергетической установкой

Fig. 2. Scheme of operation of the hardware and software complex for controlling the power line

В части использования гелиоколлекторов разработаны и запатентованы несколько новых решений, заключающихся в конструктивных изменениях, которые позволяют повысить эффективность их применения [8]. При этом управление режимами работы также осуществляется АПК.

Предложенный алгоритм подходит для разных программ и солнечных установок, но при выборе конфигурации необходимо задавать температурные параметры (максимальные и желаемые), что обеспечит быструю обработку и выдачу ошибки в данный момент времени. Показатели, полученные в результате обработки ошибки, приведут к началу действий установки. По факту такая работа контроллера основывается на прогнозируемом техническом обслуживании, которое обеспечивается внедренным ИИ или вычислительной системой. В зависимости от выбора АПК пользователь получает не только возможность регулирования и управления, но также предупреждения отказов оборудования и обеспечения своевременной передачи данных в специализированные организации, обеспечивающие техническое обслуживание.

Таким образом, выбор и внедрение правильного ПО для управления современными энергетическими установками важны. Отечественные разработки в системе АПК управления энергетическими установками могут максимизировать их эффективность.

### Заключение

1. Проанализированы наиболее популярные модели управления энергетическими установками, которые подходят как для частного домовладения, так и для больших коммунальных систем.

2. При проектировании аппаратно-программного комплекса для управления режимами работы солнечных панелей и гелиоколлекторов учитывались затраты на внедрение, включающие лицензирование программного обеспечения, интеграцию аппаратно-программного комплекса, обучение и текущее обслуживание.

3. Внедрение программного обеспечения для управления установками на солнечных электростанциях повысит эксплуатационную эффективность, снизит затраты. Применение солнечных панелей и гелиоколлекторов, управляемых аппаратно-программным комплексом на основе предложенной математической модели, позволит организовать обеспечение удаленных домов тепловой и электрической энергией.

### Список литературы

1. Кунелбаев, М. М. Разработка дистанционного мониторинга для систем солнечного теплоснабжения / М. М. Кунелбаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. 2021. № 1. С. 90–98. DOI: 10.14529/power210110.
2. Muhiki, Y. Automatic Solar Generation Control System / Y. Muhiki, P. Kabarakole // Automatic Control. 2019. No 15. P. 57–88.
3. Кулдашов, О. Х. Автоматизированная система мониторинга температуры рабочей поверхности солнечных панелей / О. Х. Кулдашов, У. Ж. Нигматов // Автоматика и программная техника. 2021. Т. 37, № 3. С. 108–112.
4. Амиргалиев, Е. Н. Разработка автоматизированного контроллера управления для системы солнечного теплоснабжения / Е. Н. Амиргалиев, М. М. Кунелбаев, Т. Р. Сундетов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. 2021. № 3. С. 83–90. DOI: 10.14529/power210310.
5. Кунелбаев, М. М. Численное моделирование для анализа параметров эффективности нового типа плоского солнечного коллектора / М. М. Кунелбаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. 2020. № 4. С. 77–85. DOI: 10.14529/power200409.
6. Гелиосистема отопления с двухфазной многокомпонентной жидкостью / Л. Л. Васильев [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. 2019. Т. 76, № 1. С. 56–64.
7. Омаров, Р. А. Результаты исследований двухконтурной гелиоустановки с термосифонной циркуляцией в зимний период / Р. А. Омаров, М. М. Кунелбаев, Д. Р. Омаров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. 2021. № 4. С. 66–72. DOI: 10.14529/power210408.
8. Гелиоводонагревательная установка: изобр. ВУ 23792 / В. А. Рыбак, И. М. Римарев, Аль-Аркауази Али. Опубл. 31.05.2022.

## References

1. Kunelbaev M. M. (2021) Development of Remote Monitoring for Solar Heating Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Series Power Engineering*. (1), 90–98. DOI: 10.14529/power210110.
2. Muhiki Y., Kabarakole P. (2019) Automatic Solar Generation Control System. *Automatic Control*. (15), 57–88.
3. Kuldashov O. Kh., Nigmatov U. Zh. (2021) Automated System for Monitoring the Temperature of the Working Surface of Solar Panels. *Automation and Software Engineering*. 37 (3), 108–112.
4. Amirgaliev E. N., Kunelbaev M. M., Sundetov T. R. (2021) Development of an Automated Controller for a Solar Heating System. *Bulletin of the South Ural State University. Series Power Engineering*. (3), 83–90. DOI: 10.14529/power210310.
5. Kunelbaev M. M. (2020) Numerical Modeling for the Analysis of the Efficiency Parameters of a New Type of Flat Solar Collector. *Bulletin of the South Ural State University. Series Power Engineering*. (4), 77–85. DOI: 10.14529/power200409.
6. Vasiliev L. L., Harlampidi D. Kh., Tarasova V. A., Zhuravlev A. S., Kuznetsov M. A., Grakovich L. P., et al. (2019) Solar Heating System with a Two-Phase Multicomponent Liquid. *Bulletin of the Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi*. 76 (1), 56–64.
7. Omarov R. A., Kunelbaev M. M., Omarov D. R. (2021) Results of Studies of a Double-Circuit Solar Plant with Thermosiphon Circulation in Winter. *Bulletin of the South Ural State University. Series Power Engineering*. (4), 66–72. DOI: 10.14529/power210408.
8. Rybak V. A., Rimarev I. M., Al-Arkauazi Ali (2022) *Solar Water Heating System, Invention BY 23792*. Publ. 31.05.2022.

## Вклад авторов / Authors' contribution

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

## Сведения об авторах

**Рыбак В. А.**, канд. техн. наук, доц., проректор по учебной работе, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

**Римарев И. М.**, асп. каф. физических и математических основ информатики, Белорусская государственная академия связи

## Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-85-11  
E-mail: V.Rybak@bsuir.by  
Рыбак Виктор Александрович

## Information about the authors

**Rybak V. A.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Rimarev I. M.**, Postgraduate at the Department of Physical and Mathematical Foundations of Computer Science, Belarusian State Academy of Communications

## Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-85-11  
E-mail: V.Rybak@bsuir.by  
Rybak Victor Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-95-103>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 004.75

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ INDUSTRY 4.0

В. А. КАСУМОВ<sup>1</sup>, Ш. Х. АЛИЕВА<sup>2</sup>, Т. ДЖ. ГАРАШЛЫ<sup>2</sup>, М. Я. АСАДОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Бакинский инженерный университет (г. Хырдалан, Республика Азербайджан)

<sup>2</sup>Азербайджанский технический университет (г. Баку, Республика Азербайджан)

Поступила в редакцию 14.03.2024

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

**Аннотация.** Рассмотрены существующие и широко используемые в настоящее время технологии хранения данных. Отмечено, что рост объемов цифровых информационных ресурсов астрономическими темпами привел к бурному развитию технологий их создания, хранения, доступа к ним. В условиях Industry 4.0 особое значение приобретает использование цифровых технологий для создания интеллектуальных и взаимосвязанных процессов производства и обработки данных. Технология блокчейн и облачные технологии стали неотъемлемыми компонентами современной цифровой трансформации. С учетом текущего состояния технологий хранения данных и блокчейна, сетевых возможностей, потребностей предприятий и других факторов исследованы возможности выбора и применения средств и технологий хранения, принципы совместной реализации и применения разных технологий, а также современные подходы виртуализации и технология блокчейн для решения вопросов распределенного хранения данных.

**Ключевые слова:** хранилище данных, DAS, SAN, NAS, виртуализация, VSAN, блокчейн, облачные технологии, облачные вычисления, облачные хранилища.

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

**Для цитирования.** Современные технологии хранения данных в условиях Industry 4.0 / В. А. Касумов [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 95–103. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-95-103>.

## MODERN DATA STORAGE TECHNOLOGIES IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0

VAGIF A. GASIMOV<sup>1</sup>, SHAHLA KH. ALIYEVA<sup>2</sup>, TURKEL J. GARASHLI<sup>2</sup>,  
MARYAM Y. ASADOVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Baku Engineering University (Khirdalan, Republic of Azerbaijan)

<sup>2</sup>Azerbaijan Technical University (Baku, Republic of Azerbaijan)

Submitted 14.03.2024

**Abstract.** Existing and currently widely used data storage technologies are considered. It is noted that the growth in the volume of digital information resources at an astronomical pace has led to the rapid development of technologies for their creation, storage, and access to them. In the context of Industry 4.0, the use of digital technologies to create intelligent and interconnected production and data processing processes is of particular importance. Blockchain technology and cloud technologies have become integral components of modern digital transformation. Taking into account the current state of data storage and blockchain technologies, network capabilities, enterprise needs and other factors, the possibilities of selecting and using storage tools and technologies, principles of joint implementation and application of different technologies, as well as modern virtualization approaches and blockchain technology for solving distributed data storage issues have been explored.

**Keywords:** data storage, DAS, SAN, NAS, virtualization, VSAN, blockchain, cloud technologies, cloud computing, cloud storage.

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

**For citation.** Gasimov V. A., Aliyeva Sh. Kh., Garashli T. J., Asadova M. Y. (2024) Modern Data Storage Technologies in the Context of Industry 4.0. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 95–103. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-95-103> (in Russian).

## Введение

В последнее время стремительный рост объемов цифровых информационных ресурсов привел к бурному развитию технологий их создания, хранения, доступа к ним. Четвертая промышленная революция (Industry 4.0) включает в себя взаимодействие многих современных программно-технических концепций, таких как хранение и анализ больших данных, облачные вычисления, интернет вещей, интеграция вычислительных систем и машин, киберфизические системы, интеллектуальные технологии, кибербезопасность. Таким образом, Industry 4.0 предполагает использование цифровых технологий для создания интеллектуальных и взаимосвязанных процессов производства и обработки данных.

Industry 4.0, технология блокчейн и облачные технологии стали неотъемлемыми компонентами современной жизни, позволяя внедрять инновации и повышать эффективность в различных отраслях. Технология блокчейн предоставляет безопасное и прозрачное решение для идентификации выполняемых транзакций и полученной информации. Облачные хранилища позволяют хранить и обрабатывать большие объемы данных, образующихся в результате этих технологий.

В статье рассматриваются существующие и широко используемые в настоящее время технологии хранения данных. С учетом текущего состояния технологий хранения данных и блокчейна, сетевых возможностей, потребностей предприятий и т. д. исследованы возможности их выбора и применения, принципы совместной реализации и использования, а также современные технологии виртуализации и блокчейна для решения вопросов распределенного хранения данных.

## Традиционные технологии хранения

DAS (Direct-Attached Storage – система хранения данных с прямым подключением) – это технология цифрового хранилища, которая может напрямую подключаться к серверу или компьютеру. Устройства DAS могут быть размещены внутри персонального компьютера или сервера (как на внутренних жестких дисках), либо за их пределами (как на внешних жестких дисках и носителях данных). Используемая операционная система предоставляет пользователю довольно простой интерфейс для выполнения таких операций, как чтение, изменение, удаление, переименование и т. д. данных, хранящихся на этом устройстве.

Когда технология DAS была впервые применена, она считалась новой, решающей проблемы хранения данных своего времени, и именно в этом отношении занимала значительное место. Но потребности предприятий и частных пользователей в хранилище многократно превышали объемы отдельных дисков и ограниченное пространство дисковой памяти, доступных на серверах. С другой стороны, подключение большего количества дисковых устройств к одному серверу привело бы к снижению работоспособности и производительности сервера. Таким образом, если на каком-либо сервере требовалось больше памяти, единственный способ перераспределить избыточную память, доступную на другом сервере, – это физически удалить диск с сервера, на котором есть чрезмерная память, и добавить его на сервер, на котором не хватает памяти. Однако это не всегда было легко и обычно приводило к проблемам с хранением дисковых устройств и увеличению затрат<sup>1</sup>.

Технология SAN (Storage Area Network – сеть хранения) смогла решить эту проблему, создав централизованное хранилище для серверов в единой сети. SAN решила многие проблемы, возникающие с дисковыми массивами, позволив создать централизованное хранилище и назначить единую систему логических адресов (logical unit number) на серверах внутри сети. Она является высокоскоростной сетью, соединяющей серверы баз данных, различные типы устройств хранения и оборудования (т. е. устанавливающей связь между ними) и обеспечивающей обмен

<sup>1</sup> Storage Types (DAS, NAS & SAN). Available: <https://networkwalks.com/storage-types-das-nas-san/>.

данными между этими устройствами с целью обслуживания большого числа пользователей сети. Скорость передачи информации по кабелям Ethernet LAN была недостаточной для ввода/вывода (I/O) на диск, а также дорогостоящей. Но, несмотря на эти недостатки, SAN произвела революцию в качестве хранилища данных в центрах обработки данных.

Параллельно с SAN использовалась технология NAS (Network-Attached Storage – сетевое хранилище), которая обладала большей гибкостью, но не имела полных возможностей протокола хранения. NAS – это файловая система, обеспечивающая хранение данных по локальной сети и получение этих данных авторизованными лицами. Средства хранилища NAS, используемые в организациях и на предприятиях, позволяют пользователям хранить свои данные самостоятельно, поскольку оно настроено для распространения файлов. В любом месте, где есть интернет, можно получить доступ к этим данным с помощью облачных приложений, также обеспечивается защита данных за счет резервного копирования (рис. 1). Наряду с функцией распределения файлов, низкая стоимость технологии NAS (дешевле, чем SAN) и возможность реализации через Ethernet привела к более широкому ее использованию<sup>2</sup>.



Рис. 1. Общая структурная схема технологий DAS, SAN и NAS  
Fig. 1. General structural diagram of DAS, SAN and NAS technologies

Еще одна особенность средств хранения NAS заключается в том, что оно имеет свою операционную систему. Средства хранения NAS обычно используют такие операционные системы, как Linux, FreeNAS, NASLite, Nexenta OS, OpenSolaris и т. д. Средство хранения NAS в сети выполняет свою деятельность с помощью таких протоколов, как SMB, NFS, HTTP, AFS, UPnP. Оно может быть организовано из большого количества дисков и позволяет решить проблему возникновения потери данных благодаря особенностям RAID-операций.

В настоящее время администратор сети может устанавливать и управлять двумя или более сетями SAN и серверами DAS в рамках одной технологии NAS. А это привело к появлению некоторых препятствий для применения технологии SAN, и совместное использование таких разных компонентов не дало желаемого эффекта<sup>3</sup>. Многим производителям SAN и NAS приходилось применять специальные протоколы и инструменты управления, что способствовало дополнительной нагрузке на технологии. Сегодня DAS, SAN, NAS, которые осуществляют миграцию информации между устройствами для решения проблемы хранения данных, по отдельности не так полезны для эпохи смарт-технологий, в том числе интернета вещей. Возникали серьезные проблемы с управлением структурированными и неструктурированными данными в используемых хранилищах, что привело к необходимости виртуализации хранилищ<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Blockchain Technology for the 5G-Enabled Internet of Things Systems: Principle, Applications and Challenges - Scientific Figure on ResearchGate. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Migration-from-centralized-cloud-storage-to-blockchain-based-distributed-storage\\_fig4\\_333572137](https://www.researchgate.net/figure/Migration-from-centralized-cloud-storage-to-blockchain-based-distributed-storage_fig4_333572137).

<sup>3</sup> Anne Taylor (2018) *Blockchain is Coming for Storage*.

## Технологии виртуализации хранилищ данных

Следует отметить, что в последние годы увеличение емкости запоминающих устройств, кластеризация и виртуализация вычислительных ресурсов и ресурсов памяти множества компьютеров, применение технологий Grid и Cloud Computing для обработки и хранения данных практически смогли устранить проблемы с хранением<sup>3</sup>. Под виртуализацией памяти понимается процесс, обеспечивающий возможность использования данных, собранных (хранящихся) на ряде отдельных физических устройств, как на одном устройстве, с помощью специального программного обеспечения. Преимущества в виртуализации памяти – это то, что она предлагает возможность систематически объединять в единое устройство хранения все устройства хранения, принадлежащие различным сетям, провайдерам и центрам обработки данных, и управлять ими. В целом виртуализация хранилищ повышает производительность, масштабируемость и прибыль организации. Все больше компаний используют эту технологию, поскольку виртуализация хранилища помогает объединять данные под одной консолью и управлять ими, обеспечивать гибкость и масштабируемость источников хранения путем отделения программного обеспечения от инфраструктуры<sup>4</sup>.

На уровне данных существует два типа виртуализации хранилища: блочная и файловая. Блочная является наиболее распространенным типом виртуализации и применяется в организациях. Сначала система идентифицирует все доступные блоки по отдельности, независимо от местоположения или провайдера, а затем сохраняет эти данные в физической памяти, связывая адрес с устройством виртуальной памяти.

VSAN (Virtual Storage Area Network – виртуальная сеть хранения данных) – сеть виртуальных хранилищ, созданная компанией Cisco, имеет такой же принцип работы, что и VLAN (Virtual Local Area Network – виртуальная локальная сеть). Принцип работы технологии VSAN основан на принципе работы сети хранения данных SAN, однако в отличие от SAN она имеет не физическую, а логическую структуру (рис. 2).

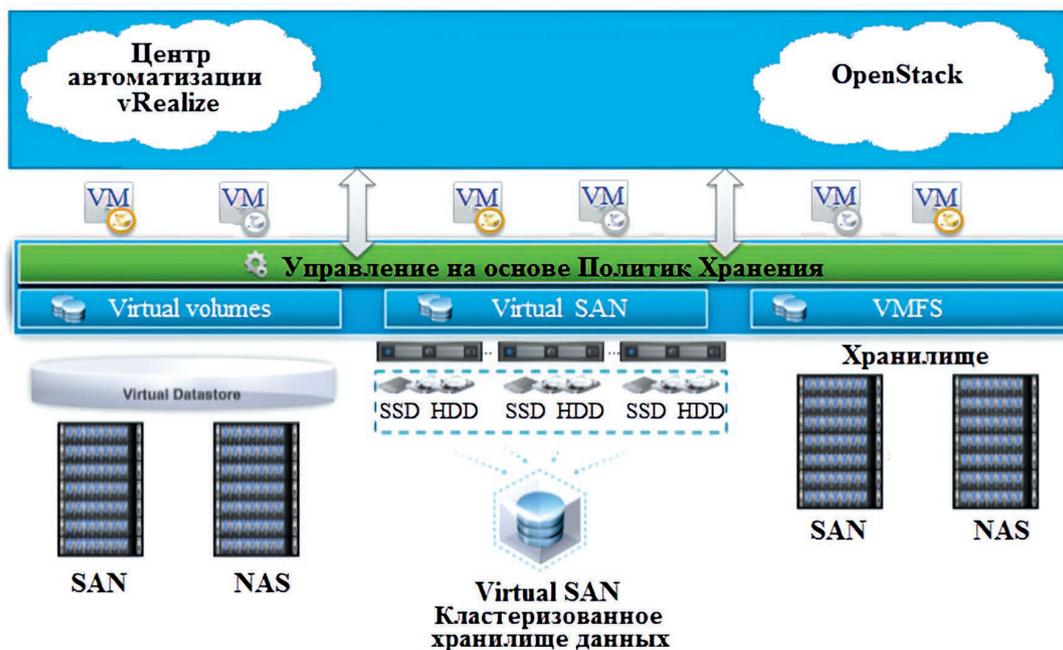


Рис. 2. Архитектурное описание принципа работы сети хранилища VSAN<sup>5</sup>  
Fig. 2. Architectural description of the principle of operation of the VSAN storage network<sup>5</sup>

<sup>4</sup> Rawlinson Rivera (2015) *SDS – The Missing Link – Storage Automation for Application Service Catalogs*. Available: <https://blogs.vmware.com/virtualblocks/2015/04/14/sds-the-missing-link-storage-automation-for-application-service-catalogs/>.

<sup>5</sup> Tianqi Yu, Xianbin Wang, Yongxu Zhu (2019) *Blockchain Technology for the 5G-Enabled Internet of Things Systems: Principle, Applications and Challenges*.

Помимо необходимости в сетевых устройствах, кабелях для создания физической системы SAN, процессы установки, настройки и подключения этих устройств требуют как временных, так и финансовых затрат. Система VSAN логически устанавливается на поддерживающие ее устройства и использует ресурсы физической системы SAN. Поэтому, применяя VSAN, нет необходимости в каких-либо финансовых затратах с точки зрения технического обслуживания. Процесс создания виртуального хранилища SAN осуществляется через коммутатор. Формирование большого количества инструментов виртуального хранилища SAN позволяет целенаправленно управлять сетевым трафиком. Таким образом, созданная система приобретает управляемую структуру<sup>2</sup>.

Любые проблемы, возникающие в средствах хранения VSAN, могут быть проанализированы более простым способом и решены быстрее, чем в SAN. Кратковременное решение проблемы в системе позволяет устранить возникшие угрозы ее доступности. В частности, средство хранения VSAN считается более удобным с точки зрения решения проблем для крупных предприятий.

Виртуализация на уровне файлов выполняется через устройства NAS. Поскольку управление различными устройствами NAS по отдельности требует много времени и затрат, этот метод не считается рентабельным. Помимо индивидуального управления для устройств NAS необходимо, чтобы пользователи знали имя физического пути для доступа к файлу. Перенос данных со старых устройств NAS на новые устройства NAS вызывает проблему, которая приводит к дополнительным расходам для компании. Виртуализация хранилищ предоставляет следующие преимущества.

*Простое управление.* С каждым днем данные подвергаются все большему количеству атак, что увеличивает потребность в виртуализации хранилищ. Возможности поиска, сбора данных и контроля за их сохранностью очень важны для организации. С помощью виртуализации хранилищ можно реализовать простой контроль и решить эту проблему [1].

*Более удобное резервное копирование.* Если произойдет непредвиденное событие, такое как кибератака или стихийное бедствие, в результате чего критические данные будут потеряны, повреждены или уничтожены, то возможность восстановления этих данных из нескольких приложений очень важна для организаций. Внедрение технологии SAN позволяет решить эту проблему, т. е. запоминать текущее состояние источников данных через SAN. Таким образом, становится возможным сделать резервную копию или восстановить любую информацию в любое время.

*Копирование и восстановление данных.* Позволяет удобно переносить (копировать) данные с одного устройства на другое независимо от местоположения. Сегодня многие организации хранят свои устройства резервного копирования в Data Recovery.

*Снижение затрат.* Наличие центральной панели для управления несколькими хранилищами не только экономит время и прибыль, но и упрощает правильное использование ресурсов и управление ими.

Виртуализация хранилищ – не новая технология. Организации годами используют эту технологию для решения проблем с хранением данных. По мере того как объемы данных быстро увеличиваются, потребность в виртуализации хранилищ с каждым днем возрастает. Но это также приносит с собой некоторые трудности [2]. Проблемы, возникающие при виртуализации хранилищ, таковы:

– гибкость и масштабируемость: виртуализация хранилища не всегда позволяет выбрать удобное приложение из-за нескольких технических препятствий, таких как масштабируемость. Организации, как правило, имеют различные аппаратные и программные компоненты, предоставляемые отдельными производителями, что затрудняет управление различными программными и аппаратными средствами. В этих случаях в распределенных системах хранения может возникнуть необходимость в быстрых обновлениях из-за сложного характера приложений и утечек данных. Кроме того, такие проблемы, как отсутствие гибкости, масштабируемости, большего анализа данных и быстрого доступа к ним, являются важными факторами, которые компании должны учитывать при выборе правильного решения проблем хранения данных;

– безопасность данных: как всегда, она остается важной проблемой. Хотя некоторые эксперты утверждают, что виртуальные машины и серверы более безопасны, чем физические устройства. Кроме того, проблемы безопасности и управления данными также могут возникать при виртуализации хранилищ, и виртуальные среды могут привлекать новые кибератаки [3, 4];

– управление и интеграция: виртуализация полностью портит внешний вид данных. Решение виртуализированного хранилища должно быть интегрировано с существующими инструментами и системами, иметь возможность работать или взаимодействовать с существующей инфраструктурой.

Подобные проблемы также ускорили процесс перехода к использованию облачных хранилищ на следующем этапе. С каждым днем все больше данных собирается как внутри организации, так и в облачных средах. Рост использования интеллектуальных технологий увеличивает потребность в облачных хранилищах.

Облачные технологии считаются одним из чрезвычайно успешных подходов к выполнению вычислений данных. Здесь большие объемы цифровой информации централизованно хранятся и управляются через облачные сервисы IaaS (Infrastructure as a service – инфраструктура как услуга), PaaS (Platform as a service – платформа как услуга), SaaS (Software as a service – программное обеспечение как услуга). В то же время, хотя выбор облака повышает производительность и эффективность, можно столкнуться с некоторыми проблемами, такими как задержка и пропускная способность. Это снижает скорость доступа к информации из базы данных. Настройка и управление несколькими каналами данных делают сети передачи данных слишком сложными [5, 6].

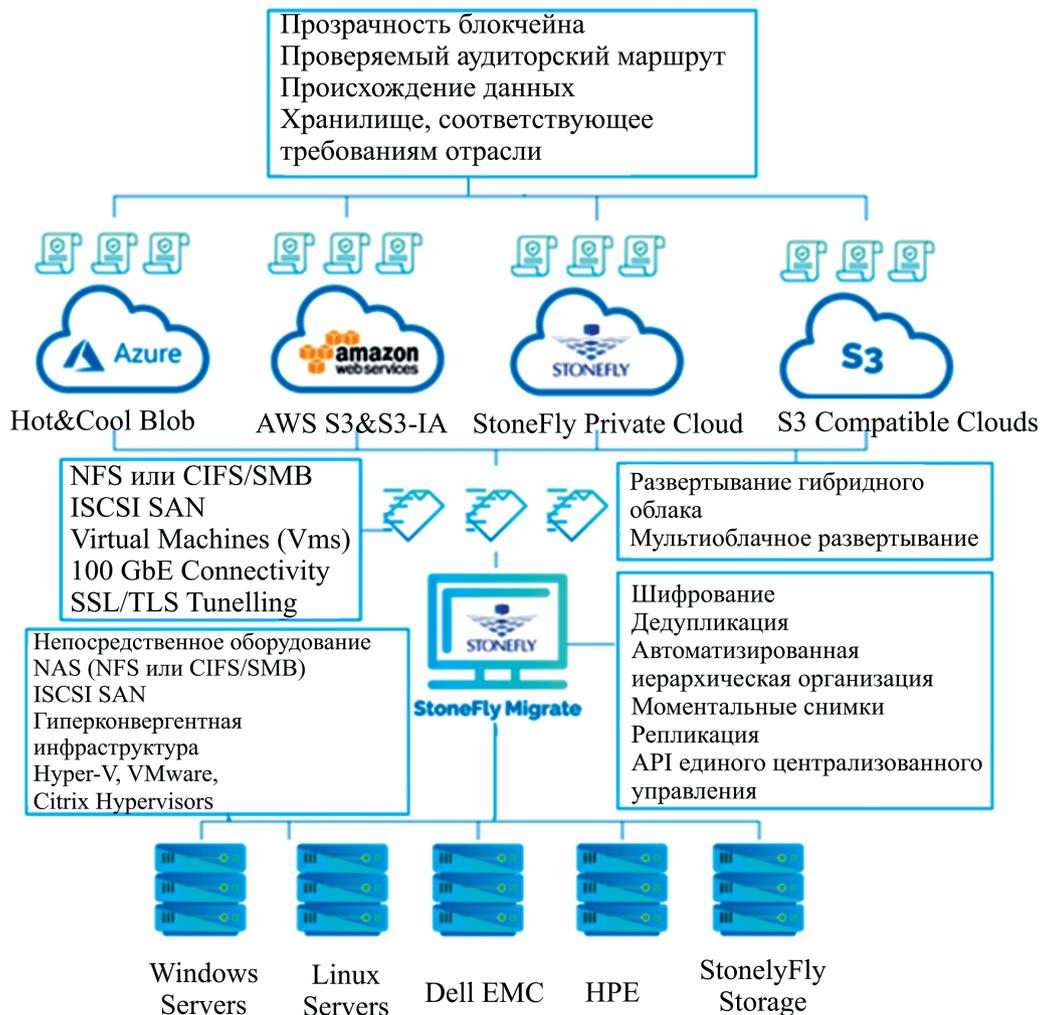
Поддержание работы всех сетей хранения данных в контекстах защиты конфиденциальных данных, обеспечения удобства работы с облаками и распределения данных между хранилищами – это совершенно разные концепции. Требование одновременного доступа к данным, находящимся в разных хранилищах, ставит задачу сохранения всего потока данных, что создает дополнительные проблемы, связанные со скоростью передачи данных и пропускной способностью.

### **Надежное и безопасное распределенное хранение данных в облаках**

Когда приобретается новое запоминающее устройство с определенным объемом, это ограничивает количество устройств хранения данных в пакете сети хранения данных (SAN), его архитектуру и структуру резервного копирования. Если SAN выходит за рамки своих возможностей, возникает путаница с точки зрения распределения нагрузок, переключения между ними, и управление становится трудным. При возникновении таких проблем реализуются новые инструменты для сбора данных в хранилищах. Для расширения существующей среды хранения облачные технологии позволяют хранить на сервере одной компании данные других организаций и отдельных пользователей. Но даже те, кто предоставляет облачные сервисы, сталкиваются с определенными ограничениями, связанными с возможностями, которые они имеют внутри организации.

Внедрение технологии блокчейн на облачном уровне считается более надежным из-за возникновения таких проблем, как вмешательство в данные тех, кто использует технологию общего хранения данных, их кража, модификация и т. д. [7]. Хотя технология блокчейн была впервые реализована для криптовалют, позже она нашла широкое применение в банковской, финансовой и многих других сферах деятельности. Технология блокчейн, как распределенная и надежная система, очень удобна для безопасного хранения данных. Организации имеют возможность хранить свои важные данные через блокчейн и быстро получать к ним доступ (рис. 3).

Блокчейн – это технология хранения данных в узлах децентрализованной сети, которая использует свободное пространство устройств хранения данных на жестком диске своих пользователей в глобальном масштабе. Эта децентрализованная инфраструктура представлена как альтернатива централизованному облачному хранилищу и способна решить многие проблемы, с которыми сталкивается централизованная система. В хранилище блокчейна данные сначала разбиваются на блоки, а копии этих блоков хранятся на отдельных компьютерах, чтобы предотвратить потерю данных во время ошибок, которые могут возникнуть в процессе передачи и хранения. Данные шифруются с помощью секретного ключа пользователя при вводе в блоки. Это также позволяет обеспечить конфиденциальность этих данных в сети. Блоки распределяются по децентрализованным узлам сети. Взаимодействия блоков записываются в реестре блокчейна, что позволяет проверять и синхронизировать операции между узлами в системе. Цель технологии блокчейн – постоянно фиксировать и контролировать эти взаимодействия, что предотвращает несанкционированное изменение данных.



**Рис. 3.** Взаимосвязь между технологиями блокчейн и облачными хранилищами  
**Fig. 3.** The relationship between blockchain technologies and cloud storage

Таким образом, технология блокчейн, которая представляет собой постоянно открытый реестр для хранения и управления данными, предлагает возможности использования облачных технологий в различных областях, чтобы устранить все проблемы безопасности и обеспечить надежность данных [8]. Вторжения и атаки на данные часто сосредоточены на центральной базе данных внутри организации или в облаке. Когда база данных или сервер подвергаются атаке, возникают проблемы, по крайней мере временно, с их функционированием. В модели блокчейна, если хакер может взломать какой-то блок, это не будет влиять на другие блоки, и, таким образом, транзакции (операции) могут продолжаться. Тот же принцип остается в силе и при отключении электроэнергии.

Когда имеется необходимость прохождения через узлы в сети и синхронизации больших объемов данных в цепочке хранения, процесс может замедлиться, несмотря на то, что он является надежным и продолжительным [7, 8]. Но блокчейн, как парадигма, объединяющая облако и хранилища данных, в настоящее время находится на начальной стадии разработки. Ожидается, что он даст желаемый эффект в ближайшем будущем (рис. 4).

Одна из дополнительных проблем, которую необходимо решить, связана с различными хранилищами данных, имеющими высокую сложность и стоимость для большинства организаций. Еще один вопрос, столь же важный, как создание, подготовка, обработка данных, – это управление и безопасное хранение данных, приведенных в наиболее подходящую форму. Имеется много факторов, которые важно учитывать в процессах управления и хранения. Эти факторы включают различные инструменты, такие как создание резервных копий данных, шифрование, обновление и использование безопасных интернет-протоколов [6, 9].

Загрузка данных Избыточность Сегментирование и шифрование Распределение по хостам

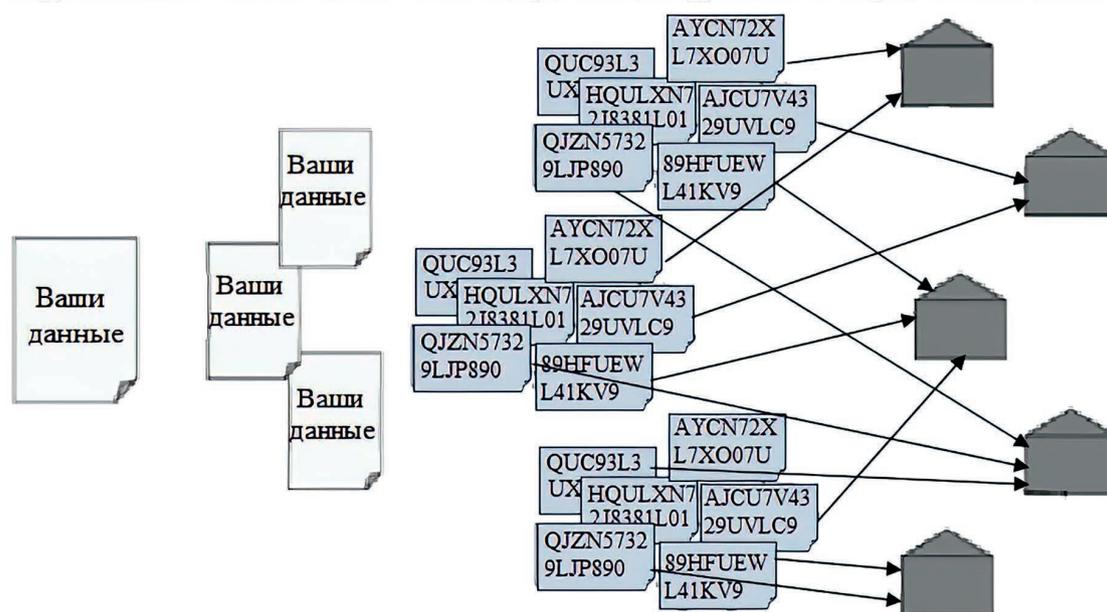


Рис. 4. Облачное хранилище blockchain<sup>6</sup>  
Fig. 4. Blockchain cloud storage<sup>6</sup>

## Заключение

1. Технологии хранения нашли свое применение и развились в процессах управления, хранения и доступа к информации. В результате исследования технологий DAS, SAN и NAS, являющихся основными технологиями хранения данных в сетях, на основе анализа их особенностей, достоинств и недостатков сделан вывод о том, что совместное использование SAN и NAS имеет преимущество, обеспечивает высокую эффективность и т. д.

2. С целью устранения проблем и трудностей, с которыми может столкнуться пользователь, предлагается использовать самые современные технологии хранения VSAN и технологии виртуализации хранилищ. При этом особое внимание следует уделить облачным хранилищам для решения задач хранения данных.

3. С внедрением облачных хранилищ и сопутствующей им технологии блокчейн можно достигать более надежного и безопасного хранения данных.

## Список литературы / References

1. Wang S., Wang X., Zhang Y. (2019) A Secure Cloud Storage Framework with Access Control Based On Blockchain. *IEEE Access*. 7, 112713–112725.
2. Zhu L., Gai K., Li M. (2019) Exploring Topics in Blockchain-Enabled Internet of Things. *Cham, Switzerland: Springer*. 109–114.
3. Xu Q., Aung K. M. M., Zhu Y., Yong K. L. (2018) A Blockchain-Based Storage System for Data Analytics in the Internet of Things. In *New Advances in the Internet of Things*. Springer, Cham, Switzerland. 119–138.
4. Xueping Liang, Sachin Shetty, Deepak Tosh, Charles Kamhoua, Kevin Kwiat, Laurent Njilla (2017) Prochain: A Blockchain-Based Data Provenance Architecture in Cloud Environment with Enhanced Privacy and Availability. In *Proceedings of the 17<sup>th</sup> IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud, and Grid Computing*. 468–477. <https://doi.org/10.1109/CCGRID.2017.8>.
5. Chenhan Xu, Kun Wang, Mingyi Guo (2017) Intelligent Resource Management in Blockchain-Based Cloud Data Centers. *IEEE Cloud Computing*. 4 (6), 50–59. <https://doi.org/10.1109/MCC.2018.1081060>.
6. Zheng Z., Xie S., Dai H. N., Chen X., Wang H. (2018) Blockchain Challenges and Opportunities: A Survey. *International Journal of Web and Grid Services*. 14 (4), 352–375.

<sup>6</sup> Blockchain and Cloud Storage: Industry Introduction. Available: <https://investmentbank.com/blockchain-cloud-industry-intro/>.

7. Gasimov V. A., Aliyeva Sh. Kh. (2021) Using Blockchain Technology to Ensure Security in the Cloud and IoT Environment. *International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications, June 11–13, Turkey*.
8. Gasimov V., Aliyeva Sh. (2020) Basic Components of the Digital Business: Cryptocurrency, Blockchain, Cloud Technologies and Internet of Things. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, Turkey*. 97–105.
9. Gasimov V., Aliyeva Sh. (2020) The Role of Cloud Technology in the Formation of Digital Economy. *International Conference “Digital Economy: Modern Challenges and Real Opportunities”*. UNEC, Baku.

#### **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-р техн. наук, проф., декан факультета информационных и компьютерных технологий, Бакинский инженерный университет

**Алиева Ш. Х.**, ст. преп. каф. компьютерных технологий, Азербайджанский технический университет (АТУ)

**Гарашлы Т. Дж.**, докторант каф. компьютерных технологий, АТУ

**Асадова М. Я.**, докторант каф. компьютерных технологий, АТУ

#### **Адрес для корреспонденции**

AZ 0101, Республика Азербайджан,  
г. Хырдалан, ул. Гасана Алиева, 120  
Бакинский инженерный университет  
Тел.: +994 70 213-99-98  
E-mail: vaqasimov@beu.edu.az  
Касумов Вагиф Алиджавад оглы

#### **Information about the authors**

**Gasimov V. A.**, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Dean of the Faculty of Information and Computer Technologies, Baku Engineering University

**Aliyeva Sh. Kh.**, Senior Lecturer at the Department of Computer Technologies, Azerbaijan Technical University (ATU)

**Garashli T. J.**, Doctoral Student at the Department of Computer Technologies, ATU

**Asadova M. Y.**, Doctoral Student at the Department of Computer Technologies, ATU

#### **Address for correspondence**

AZ 0101, Republic of Azerbaijan,  
Khirdalan, Hasan Aliyev St., 120  
Baku Engineering University  
Tel.: +994 70 213-99-98  
E-mail: vaqasimov@beu.edu.az  
Gasimov Vagif Alijavad oglu



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-104-112>

*Оригинальная статья*  
*Original paper*

УДК 339.138

## РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ ИТ-ДИАГНОСТИКИ ПАЦИЕНТОВ

В. А. ВИШНЯКОВ, ЮЙ ЧУ ЮЭ

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

*Поступила в редакцию 12.04.2024*

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

**Аннотация.** Разработана и смоделирована работа сети, которая реализует алгоритмы ИТ-диагностики неврологических заболеваний на базе технологии интернета вещей. Сеть включает смартфон, платформу, нейронную сеть и приложения. Сначала со смартфона вводятся голоса заболевших пациентов для обучения нейронной сети, а потом – обследуемых пациентов для ИТ-диагностики. Передача данных между смартфоном и платформой (ThingSpeak) происходит по протоколу MQTT. Мобильное приложение смартфона извлекает голосовые функции обследуемых пациентов и записывает их на платформу сети интернета вещей. Распознавание происходит с использованием обученной нейронной сети. Представлены структура и алгоритм работы платформы ThingSpeak. Показатели ИТ-диагностики отображаются в приложении на смартфоне. Данные пациентов, использованные в исследовании, взяты из программы ADReSS 2020 Challenge, которая содержит речевые данные пациентов с болезнью Альцгеймера и здоровых людей.

**Ключевые слова:** ИТ-диагностика, болезнь Альцгеймера, сеть интернета вещей, MQTT, облачная платформа, моделирование.

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

**Для цитирования.** Вишняков, В. А. Разработка и моделирование сети интернета вещей для ИТ-диагностики пациентов / В. А. Вишняков, Юй Чу Юэ // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 104–112. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-104-112>.

## DEVELOPMENT AND MODELING OF THE INTERNET OF THINGS NETWORK FOR PATIENTS IT DIAGNOSTICS

ULADZIMIR A. VISHNIAKOU, YU CHU YEU

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

*Submitted 12.04.2024*

**Abstract.** The work of a network that implements algorithms for IT diagnostics of neurological diseases based on the Internet of Things technology has been developed and modeled. The network includes a smartphone, a platform, a neural network, and applications. First, the voices of sick patients are entered from the smartphone to train the neural network, and then the examined patients for IT diagnostics. Data is transferred between the smartphone and the platform (ThingSpeak) via the MQTT protocol. The smartphone's mobile application extracts the voice functions of the examined patients and records them on the Internet of Things network platform. Recognition is performed using the trained neural network. The structure and algorithm of the ThingSpeak platform are presented. IT diagnostics data are displayed in the application on the smartphone. The patient data used in the study are taken from the ADReSS 2020 Challenge program, which contains speech data of patients with Alzheimer's disease and healthy people.

**Keywords:** IT diagnostics, Alzheimer's disease, internet of things network, MQTT, cloud platform, simulation.

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

**For quoting.** Vishniakou U. A., Yu Chu Yeu (2024) Development and Modeling of the Internet of Things Network for Patients IT Diagnostics. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 104–112. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-104-112> (in Russian).

## Введение

Данные от сенсоров могут предоставить детальную физиологическую и поведенческую информацию пациентов, что имеет важное значение для диагностики неврологических заболеваний [1]. Алгоритмы и методы машинного обучения позволяют обрабатывать звуковые данные пациентов, получаемые от сенсоров. С использованием сетей интернета вещей (IoT) на основании этих данных реализуется IT-диагностика. Клиническими симптомами заболевших людей являются замедление, монотонность, дрожь звуков речи. Пациенты с болезнью Альцгеймера (БА) плохо справляются с семантическими задачами, часто путают имена или не могут назвать их точно [2]. Нелингвистические показатели, которые связаны с БА, включают фонологическую непрерывность, продолжительность и пропорцию немых сегментов. Полезные лингвистические показатели требуют автоматического распознавания голоса для оценки, включая фонологическое богатство и соотношение различных лексических свойств [3]. Одним из способов оценки наличия у субъекта неврологического заболевания является анализ данных с датчиков и их обработка [4].

## Отличительные особенности голоса пациентов с неврологическими заболеваниями

Неврологические заболевания проявляются различными симптомами на разных стадиях болезни. Исследования показывают, что речь заболевших пациентов подвергается нарушениям [5]. Типичные голосовые нарушения у заболевших людей включают уменьшение диапазона голоса, снижение основной частоты у женщин (нормальный уровень – примерно от 248 до 175 Гц), повышение основной частоты у мужчин (со 110 до 135–160 Гц), большие вариации частоты (джиттер) и амплитуды (шиммер) голоса, уменьшение резонанса и увеличение пауз в речи [6]. Кроме того, пациенты с БА обычно испытывают трудности с называнием и поиском слов (аномия), что приводит к перифразам, а также с намеренным доступом к семантической информации, что приводит к общей семантической деградации [7].

Спонтанная речь и задачи чтения являются наиболее часто используемыми задачами при различных заболеваниях. Помимо популярных наборов инструментов для извлечения признаков, во многих исследованиях также применяются настраиваемые наборы признаков [8]. Основываясь на голосовых характеристиках пациентов с БА, в [9] приведено исследование между пациентами с болезнью Альцгеймера и здоровыми людьми, основанное на анализе расшифрованных речевых текстов с использованием методов машинного обучения, доказана возможность выявления БА путем анализа семантической информации в выражениях естественного языка пациентов. Преобразуя речевые данные в текст и анализируя эти тексты с помощью классификатора Random Forest (случайный лес), исследователи могут идентифицировать специфические языковые особенности, связанные с БА. Случайный лес – это метод ансамблевого обучения, применимый для задач классификации и регрессии. Аналогичным образом для болезни Паркинсона, которая также является неврологическим заболеванием, раннее выявление можно осуществить путем извлечения и анализа различных акустических характеристик из голосовых записей, таких как тремор, мерцание, параметры основной частоты, гармонические параметры, мел-частотные кепстральные коэффициенты (MFCC) и характеристики вейвлет-преобразования [10].

## Структура сети IT-диагностики

Для автоматизации IT-диагностики неврологических заболеваний необходимо создать структуру сети IoT [11, 12]. Чтобы автоматизировать задачу обнаружения БА, разработали сеть IoT с использованием акустических функций, полученных из голоса пациента. Она включает смартфон (ввод голосов пациентов, вывод результатов распознавания), нейронные сети (для распознавания), платформу (для обработки звуков голоса) и приложения.

Когда пациент заходит в приложение ввода на смартфоне, отображается картинка или вопрос, требующий ответа либо описания на основе этого вопроса или картинки, а затем голос участника собирается и загружается в библиотеку для оценки. Платформа включает сервер, базу данных, нейронную сеть глубокого обучения. База хранит данные о голосах заболевших пациентов, полученные из больниц. Из них извлекаются акустические характеристики, которые служат обучающим набором для нейронной сети. Клиентское приложение отображает на экране вероятность того, что у исследуемого пациента болезнь Альцгеймера. Результаты тестирования участников отправляются на адрес электронной почты зарегистрированного пользователя. На рис. 1 показана базовая структура сети IoT, которая состоит из набора данных, алгоритмов нейронной сети, данных участников, платформы IoT и мобильного приложения. Рассмотрим работу сети IoT, использующей платформу ThingSpeak.

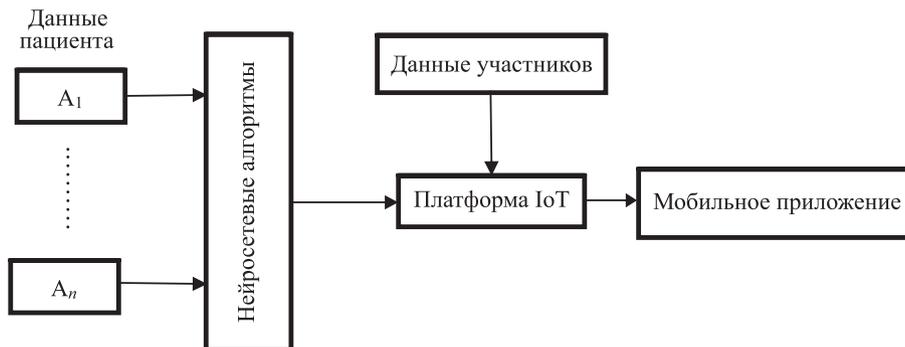


Рис. 1. Структура сети IoT для IT-диагностики  
Fig. 1. The structure of the IoT network for IT diagnostics

### Структура и функционирование платформы ThingSpeak

ThingSpeak – это платформа фирмы MathWorks для построения сети IoT, основное внимание в которой уделяется записи данных с датчиков, отслеживанию местоположения, запуску триггеров, оповещению и анализу. Платформа ThingSpeak с открытым исходным кодом обладает такими функциями, как сбор данных по частным каналам, обмен данными через общедоступные каналы, анализ и визуализация средствами MATLAB, интеграция приложений. Структура платформы показана на рис. 2.

ThingSpeak функционирует как платформа для IoT, предоставляя бесплатное хранилище для данных, собранных оборудованием, и возможность онлайн-анализа этих данных с использованием MATLAB. Инструментарий ThingSpeak для MATLAB позволяет записывать результаты выполнения решений в каналы ThingSpeak. Рассмотрим назначение компонентов платформы.

1. ThingSpeak API позволяет пользователю отправлять и получать данные из приложений или устройств с помощью API.

2. ThingSpeak Cloud предоставляет визуализацию данных, оповещения и другие функции, осуществляя хранение и управление данными датчиков в облаке.

3. ThingSpeak MQTT – протокол связи, который может использоваться для передачи данных в реальном времени между устройствами и ThingSpeak.

4. MATLAB Analysis – дополнительный модуль, позволяющий использовать средства MATLAB для анализа, моделирования, модификации и прогнозирования данных.

5. ThingSpeak Apps используется для создания пользовательских приложений и подключаемых модулей с внешними подключениями, а также для разработки приложений.

6. ThingSpeak Plugins – плагины, используемые для добавления пользовательских функций и сервисов.

7. Channels ThingSpeak – контейнер для организации и хранения данных датчиков, каждый канал имеет свой собственный ключ API и конфигурацию.

8. ThingSpeak React – платформа реагирования на инциденты и автоматизации на основе правил для настройки оповещений о данных и выполнения задач автоматизации.

9. ThingSpeak Data Repository – данные, опубликованные в канале, хранятся в облачном хранилище данных ThingSpeak с возможностью экспорта данных в форматах JSON, XML и CSV.

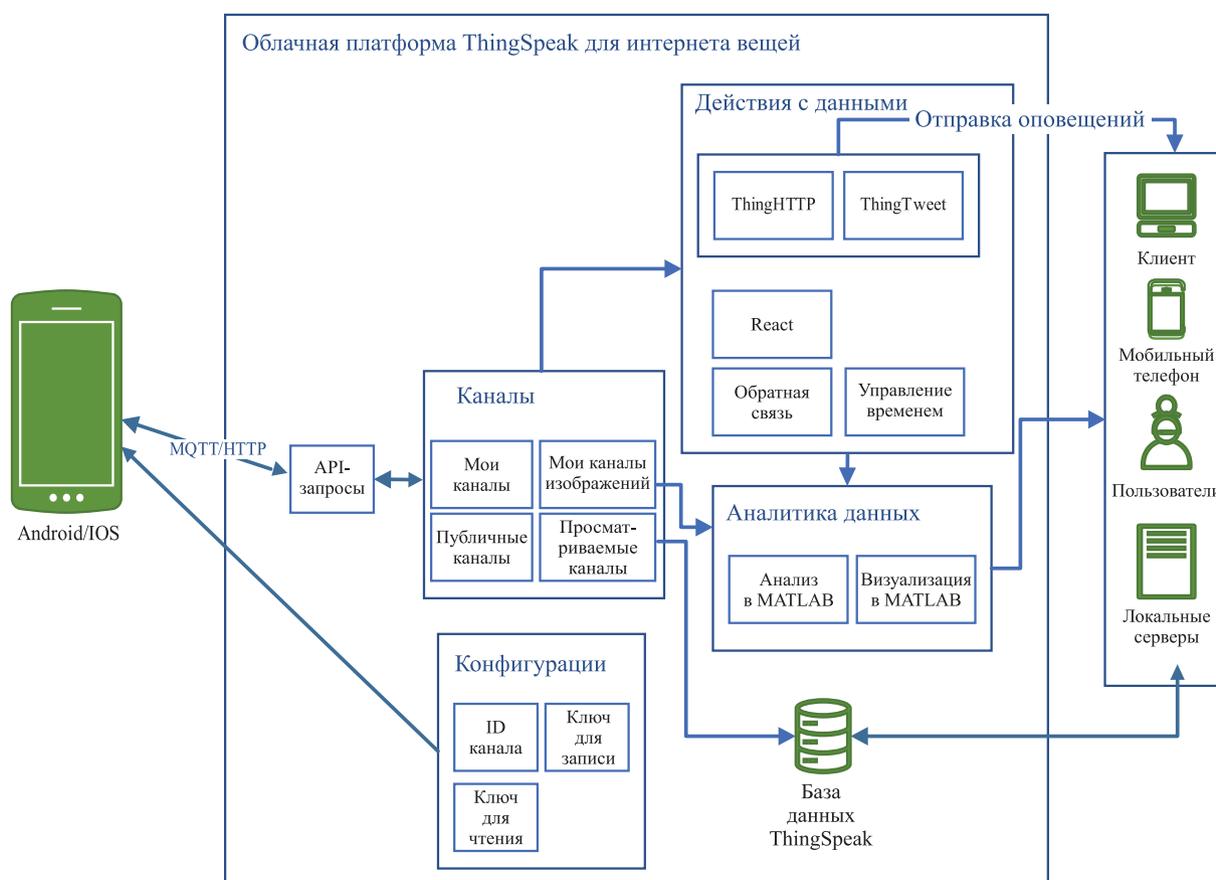


Рис. 2. Структура платформы ThingSpeak интернета вещей  
Fig. 2. Structure of the ThingSpeak IoT platform

Данные, собранные датчиком, отредактированы в канале через запрос API после предварительной обработки. Данные в канале анализируются с помощью кода MATLAB и представляются на веб-странице. Операции интерфейса над ресурсами включают получение, создание, модификацию и удаление, что соответствует методам GET/POST/PUT/DELETE протокола HTTPS. Приведем конкретное их описание.

1. GET. Примеры инструкций: [https://api.thingspeak.com/channels/<идентификатор\\_канала>/feeds.<формат>](https://api.thingspeak.com/channels/<идентификатор_канала>/feeds.<формат>)

Эта команда обычно используется для считывания информации, в данном случае с указанием номера канала, а также формата json/xml, в котором будут считываться данные. Кроме того, к команде можно добавить дополнительные атрибуты, определяющие объем информации, которую нужно считать, или формат получаемых данных.

2. POST. Примеры инструкций: <https://api.thingspeak.com/update.<формат>>

Эта команда дает возможность пользователям записывать информацию в канал. Пользователи должны указать формат данных (например, JSON или XML), а также API-ключ для аутентификации, затем в данных записывается содержимое, которое требуется изменить, записать или повторно обновить.

3. PUT. Примеры инструкций: [https://api.thingspeak.com/channels/<идентификатор\\_канала>.<формат>](https://api.thingspeak.com/channels/<идентификатор_канала>.<формат>)

Эта команда позволяет записывать настройки канала, которые включают описание канала, названия полей, местоположение канала, метаданные, статус общедоступности или приватности, а также имя канала.

4. DELETE. Примеры инструкций: [https://api.thingspeak.com/channels/<идентификатор\\_канала>.<формат>](https://api.thingspeak.com/channels/<идентификатор_канала>.<формат>)

Эта команда используется для удаления канала.

## Распознавание болезни Альцгеймера с использованием платформы ThingSpeak

Для передачи данных между смартфоном и платформой IoT ThingSpeak можно использовать три способа: протоколы MQTT, HTTP и приложение MATLAB. При выборе способа передачи данных в эксперименте были учтены природа задач и применимость каждого способа в различных сценариях.

1. Протокол MQTT более подходит для приложений IoT, требующих низкой задержки и эффективного использования энергии, когда количество устройств велико и необходимо частое обновление данных. Этот протокол позволяет реализовать мгновенное или частое обновление данных.

2. Запросы по протоколу HTTP не сохраняют состояние, что делает его подходящим для обновления данных или сценариев, где не требуется мгновенное обновление.

3. Приложение MATLAB Mobile может работать в связке с MATLAB Online, используя MATLAB-код для непосредственной связи с ThingSpeak, однако MATLAB не подходит для создания высококастомизированных коммерческих клиентских приложений.

В процессе распознавания БА и болезни Паркинсона требуется не только реализация реального времени передачи данных, но и поддержка платформы для одновременной передачи данных от множества устройств. Поэтому в эксперименте для передачи данных был выбран протокол MQTT. Компоненты платформы ThingSpeak работают следующим образом.

1. Каналы используются для хранения и получения данных, собранных с различных устройств или приложений. Клиентские данные, которые необходимо загрузить, отправляются в уже созданный канал. Пользователи при создании канала имеют четыре варианта: «Мои каналы», «Мои каналы изображений», «Каналы просмотра» и «Общедоступные каналы». В эксперименте использовался вариант «Мои каналы», как показано на рис. 3.

## My Channels

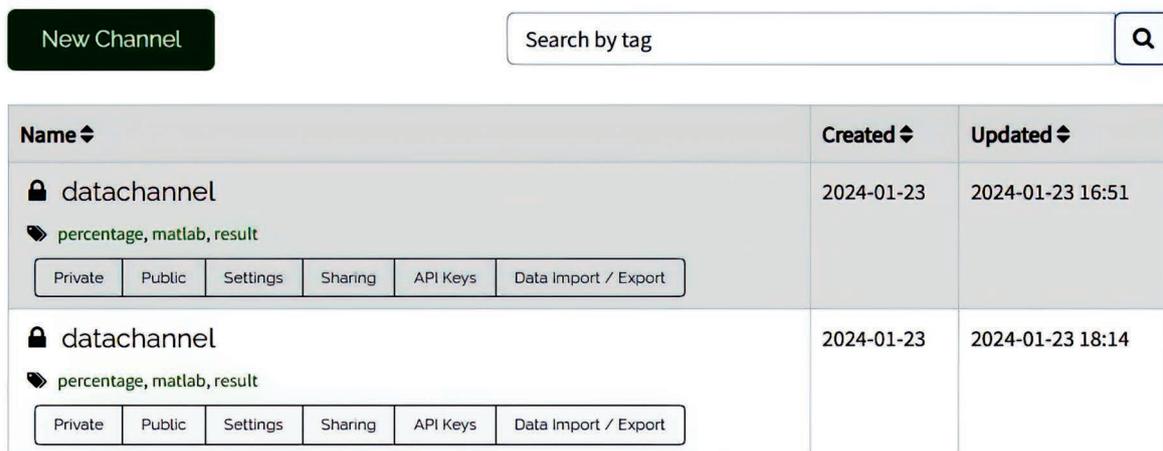


Рис. 3. Вариант «Мой канал»

Fig. 3. Option “My Channel”

После создания канала система автоматически присваивает ему уникальные идентификаторы для передачи данных: идентификатор канала (channel ID), ключ для записи API (Write API key), ключ для чтения API (Read API key). Эти API-ключи и конфигурации присутствуют у каждого канала. Каждый канал может свободно настраивать несколько полей для хранения различных типов данных. В рассматриваемом эксперименте данные пользователя, извлеченные из аудиозаписей на мобильном устройстве, были использованы для определения диагностического показателя – вероятности заболевания, представленной в виде процента. Таким образом, в канале были настроены поля для хранения идентификаторов пользователей и соответствующих результатов тестирования.

2. MQTT API. ThingSpeak MQTT позволяет устройствам общаться с ThingSpeak с низкой пропускной способностью, что может использоваться для передачи данных в реальном времени между устройствами и ThingSpeak. ThingSpeak API – это API, позволяющий пользователям отправлять и получать данные из приложений или устройств. Ключ записи API (Write API Key)

в ключе API используется для аутентификации и авторизации записи данных в указанный канал, что обеспечивает безопасность передачи данных и правильный доступ к данным канала. В рассматриваемом эксперименте использовался MQTT API для установления соединения с сервером ThingSpeak и публикации номера пользователя и результатов теста на платформу.

Чтобы получить учетные данные для аутентификации и авторизации, необходимые для обмена данными с платформой ThingSpeak через MQTT, а также для авторизации взаимодействия с определенным каналом, необходимо сначала создать устройство на платформе ThingSpeak, как показано на рис. 4.

## MQTT Devices

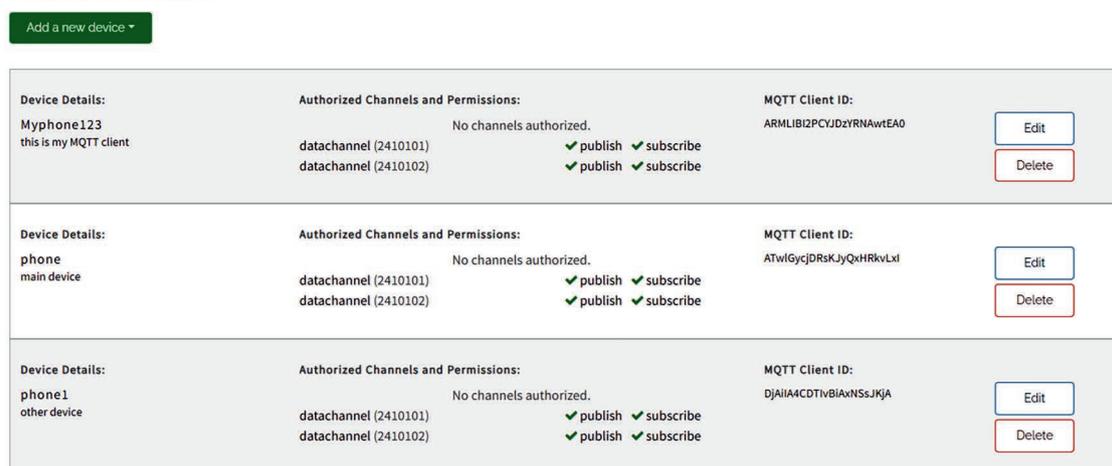


Рис. 4. Создание устройства на платформе ThingSpeak  
Fig. 4. Creating a device on the ThingSpeak platform

Были получены три идентификатора об устройстве MQTT Devices: имя пользователя, ClientID, пароль, которые вместе называются mqtt\_credentials. Их можно загрузить в виде открытого текста, сохраненного ранее для последующих шагов. Чтобы реализовать функции клиента MQTT в мобильном приложении MQTT Client, необходимо настроить параметры:

mqtt\_client\_ID = "ATwlGycjDRsKJyQxHRkvLxI" (из сохраненного файла учетных данных)

mqtt\_username = "ATwlGycjDRsKJyQxHRkvLxI" (из сохраненного файла учетных данных)

mqtt\_password = "IhpXhiOj6vTu/gJC/QueetZ3+" (из сохраненного файла учетных данных)

t\_port = 1883

mqtt\_host == "mqtt3.thingspeak.com" (имя хоста брокера MQTT на платформе ThingSpeak)

channel\_ID = "<YOUR-CHANNEL-ID>" (любой уникальный идентификатор, который вы выберете).

Надо включить переключатели enabled: Use MQTT v3.1, Clean Session. После успешной настройки на терминале появляется сообщение connected. Приложение работает на порту, что указывает на возможность нормальной подписки и публикации сообщений.

3. Темы. В соответствующей конфигурации канала ThingSpeak настроены необходимые параметры подключения. После подключения к брокеру MQTT на ThingSpeak умный мобильный клиент, функционирующий как клиент MQTT, должен публиковать данные в определенную тему. Эта тема соответствует каждому полю канала ThingSpeak. Темы могут использоваться для определения назначения сообщений и выбора уровня качества обслуживания, например, QoS 0, который указывает уровень качества обслуживания при публикации сообщений.

Публикация в канале включает:

в поле topic был введен следующий код:

Channels/2410102/publish;

поле «данные» было заполнено следующим образом:

field1=37&field2=008&status=MQTTPUBLISH

Это сообщение содержит данные для обновления полей канала ThingSpeak. После нажатия стрелки отправки, как показано на рис. 5, сервер ThingSpeak получает MQTT-сообщение от смартфона и обновляет соответствующие поля в канале. Результаты отображаются на платформе.



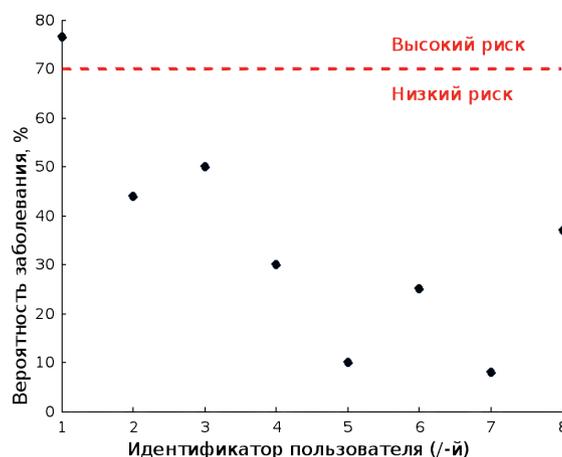
**Рис. 5.** Новые данные  
**Fig. 5.** New data

4. Анализ и визуализация данных. ThingSpeak, функционируя для IoT, предоставляет инструменты для анализа и визуализации данных:

– анализ MATLAB (MATLAB Analysis): анализ, моделирование и прогнозирование данных с помощью кода MATLAB. Пользователи могут использовать скрипты MATLAB для обработки данных;

– визуализация MATLAB (MATLAB Visualization): интерактивная визуализация данных, создание графиков и диаграмм для отображения изменений данных во времени или взаимосвязей между различными наборами данных.

С помощью инструментария MATLAB для ThingSpeak пользователи могут записывать результаты анализа MATLAB обратно в каналы ThingSpeak, включая новые вычисленные точки данных, результаты статистического анализа или любые другие формы обработанных данных. На рис. 6 показана диаграмма дискретных коррелированных данных, полученных в эксперименте с использованием визуализации в MATLAB, где обозначены пользователи с высокими и низкими рисками заболевания.



**Рис. 6.** Дискретные коррелированные данные  
**Fig. 6.** Discrete correlated data

Данные в канале анализируются с помощью встроенного кода MATLAB и отображаются на странице, предоставляя пользователю возможность выбрать, как реагировать на результаты. Преобразование данных в проценты и их представление в виде диаграмм и графиков позволяют наглядно показать состояние здоровья пациента и изменения его состояния с течением времени. Это особенно полезно для непрофессионалов. Также хранящиеся в канале ThingSpeak ранее полученные данные могут быть использованы для анализа изменений состояния заболевания с течением времени, что помогает врачам оценивать скорость прогрессирования заболевания и эффективность лечения.

5. Реагирование в реальном времени. ThingSpeak React позволяет пользователям создавать события и задачи автоматизации, основанные на определенных правилах. Это может быть использовано для настройки предупреждений о данных. Например, триггеры канала могут отправлять предупреждения или уведомления, когда данные достигают определенного порогового

значения, что позволяет вовремя принять медицинские меры. Например, если процент заболевания пользователя достигает определенного критического уровня, функция триггера ThingSpeak может быть настроена на отправку предупреждения или уведомления врачу либо лицу, осуществляющему уход.

### Обсуждение результатов

Для оценки работы предложенной сети применяли три метода повторной выборки исходных данных пациентов как с БА, так и здоровых людей [13]: перекрестную проверку без учета одного субъекта (LOSO), перекрестную проверку в К раз (K-Fold), метод начальной выборки (Bootstrap Sampling). Подробно эти методы описаны в [9].

В табл. 1 представлено сравнение точности, достигнутой этими тремя методами выборки данных, используемых для IT-диагностики БА, наряду с лучшим известным результатом распознавания БА из [14]. Базовый результат получили с помощью классификатора LDA с лингвистическими особенностями при перекрестной проверке LOSO для задачи классификации БА.

**Таблица 1.** Сравнение полученных результатов распознавания болезни Альцгеймера с имеющимися  
**Table 1.** Comparison of the obtained results of Alzheimer's disease recognition with known ones

Набор данных	Исследователь	Алгоритм нейронной сети	Метод оценки данных	Точность, %
Ad_speech	Авторы	Random forest classifier	LOSO	85,2
Ad_speech	Авторы	Random forest classifier	K-Fold	87,6
Ad_speech	Авторы	Random forest classifier	Bootstrap Sampling	87,3
Ad_speech	[14]	LDA	LOSO	89,6

### Заключение

1. Представлены структура и алгоритмы распознавания болезни Альцгеймера в сети интернета вещей на базе платформы ThingSpeak. Структура интернета вещей включает смартфон (ввод голосов пациентов, вывод результатов распознавания), нейронные сети (для распознавания), платформу (для обработки звуков голоса) и приложения. ThingSpeak действует как точка агрегации данных, собирая ключевые показатели пациентов со смартфонов. Алгоритм включает передачу голосовых данных пациентов со смартфона на платформу ThingSpeak, обработку и анализ данных с использованием встроенных инструментов MATLAB, вывод результатов распознавания через приложение на смартфон.

2. Для оценки работы предложенной сети применяли три метода повторной выборки исходных данных пациентов как с болезнью Альцгеймера, так и здоровых пациентов. Лучшая точность распознавания болезни Альцгеймера составила 87,3 %.

### Список литературы / References

1. Kouchaki S., Ding X., Sanei S. (2024) AI- and IoT-Enabled Solutions for Healthcare. *Sensors*. 24 (8). DOI: 10.3390/s24082607.
2. Giannakopoulou K.-M., Roussaki I., Demestichas K. (2022) Internet of Things Technologies and Machine Learning Methods for Parkinson's Disease Diagnosis, Monitoring and Management: A Systematic Review. *Sensors*. 22 (5). <https://doi.org/10.3390/s22051799>.
3. Atzori L., Iera A., Morabito G. (2010) The Internet of Things: A Survey. *Computer Networks*. 54 (15), 2787–2805.
4. Lott S. A., Streeb E., Bachman S. L., Bode K., Dyer J., Fitzer-Attas C., et al. (2024) Digital Health Technologies for Alzheimer's Disease and Related Dementias: Initial Results from a Landscape Analysis and Community Collaborative Effort. *The Journal of Prevention of Alzheimer's Disease*. 1–10.
5. Cummins N., Scherer S., Krajewski J., Schnieder S., Epps J., Quatieri T. F. (2015) A Review of Depression and Suicide Risk Assessment Using Speech Analysis. *Speech Communication*. 71, 10–49.
6. Martínez-Nicolás I., Llorente T. E., Martínez-Sánchez F., Meilán J. J. G. (2021) Ten Years of Research on Automatic Voice and Speech Analysis of People with Alzheimer's Disease and Mild Cognitive Impairment: A Systematic Review article. *Frontiers in Psychology*. 12.

7. Haider F., De La Fuente S., Luz S. (2019) An Assessment of Paralinguistic Acoustic Features for Detection of Alzheimer's Dementia in Spontaneous Speech. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 14 (2), 272–281.
8. Hecker P., Steckhan N., Eyben F. (2022) Voice Analysis for Neurological Disorder Recognition – a Systematic Review and Perspective on Emerging Trends. *Frontiers in Digital Health*. 4.
9. Vishniakou U. A., Yu Chu Yeu (2023) Using Machine Learning for Recognition of Alzheimer's Disease Based on Transcription Information. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 106–112. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-106-112>.
10. Vishniakou U. A., YiWei Xia (2023) IT Diagnostics of Parkinson's Disease Based on the Analysis of Voice Markers and Machine Learning. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 102–110. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-102-110>.
11. Vishniakou U. A. (2023) *Specialized IoT Systems: Models, Structures, Algorithms, Hardware, Software Tools*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
12. Maureira M. A. G., Oldenhof D., Teernstra L. (2011) ThingSpeak – an API and Web Service for the Internet of Things. *Computer Science*. Available: [http://mediatechnology.leiden.edu/images/uploads/docs/w\\_t2014\\_thingspeak.pdf](http://mediatechnology.leiden.edu/images/uploads/docs/w_t2014_thingspeak.pdf) (Accessed 25 March 2018).
13. Luz S., Haider F., de la Fuente S. (2020) Alzheimer's Dementia Recognition Through Spontaneous Speech: The ADReSS Challenge. *arXiv preprint arXiv*. 2172–2176.
14. Yuan J., Bian J. Cai X. (2020) Disfluencies and Fine-Tuning Pre-Trained Language Models for Detection of Alzheimer's Disease. *Interspeech*. 2162–2126.

#### Вклад авторов / Authors' contribution

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

#### Сведения об авторах

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

**Юй Чу Юэ**, асп. каф. инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 44 486-71-82  
E-mail: [vish@bsuir.by](mailto:vish@bsuir.by)  
Вишняков Владимир Анатольевич

#### Information about the authors

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

**Yu Chu Yue**, Postgraduate at the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

#### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 44 486-71-82  
E-mail: [vish@bsuir.by](mailto:vish@bsuir.by)  
Vishniakou Uladzimir Anatol'evich