



DOI: 10.32603/1993-8985

ISSN 1993-8985 (print)
ISSN 2658-4794 (online)

Известия высших учебных заведений России

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Том 26 № 4 2023



Journal of the Russian Universities

RADIOELECTRONICS

Vol. 26 No. 4 2023

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2023

Saint Petersburg
ETU Publishing house

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ № ФС77-74297 от 09.11.2018 г.).

Индекс по каталогу АО «Почта России» П4296

Учредитель и издатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») Журнал основан в 1998 г.

Издается 6 раз в год.

Включен в RSCI на платформе Web of Science, Ulrichsweb Global Serials Director, Bielefeld Academic Search Engine,

Google Scholar, Library of Congress, Research4life, ResearchBib, WorldCat, The Lens, OpenAIRE.

Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ); соответствует декларации Budapest Open Access Initiative, является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ), Crossref.

Редакция журнала:

197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: 8 (812) 234-10-13,

e-mail: radioelectronic@yandex.ru

RE.ELTECH.RU

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», оформление, 2020

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

А. В. СОЛОМОНОВ, д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия
ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

В. М. КУТУЗОВ, д.т.н., президент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия
РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Dieter H. BIMBERG, PhD, Dr Phil. Nat. Dr H. C. Mult., исполн. директор "Bimberg Center of Green Photonics", Чанчуньский институт оптики, точной механики и физики КАН, Чанчунь, Китай

Matthias A. HEIN, PhD, Dr. rer. Nat. Habil., Prof., Технический университет, Ильменау, Германия

Jochen HORSTMANN, PhD, Dr. rer. Nat., директор департамента, Гельмгольц-центр, Гестахт, Германия

Alexei KANAREYKIN, Dr. Sci., гл. исполн. директор, Euclid TechLabs LLC, Солон, США

Erkki LANDEKANTA, PhD, Prof., Технический университет, Лаппеенранта, Финляндия

Ferran MARTIN, PhD (Phys.), Prof., Автономный университет, Барселона, Испания

Piotr SAMCZYNSKI, PhD, Dr. Sci., Associate Prof., Варшавский технологический университет, Институт электронных систем, Варшава, Польша

Thomas SEEGER, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Университет Зигена, Зиген, Германия

А. Г. ВОСТРЕЦОВ, д.т.н., проф., Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

С. Т. КНЯЗЕВ, д.т.н., доц., Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

А. Н. ЛЕУХИН, д.ф.-м.н., проф., Марийский государственный технический университет, Йошкар-Ола, Россия

Цель журнала – освещение актуальных проблем, результатов прикладных и фундаментальных исследований, определяющих направление и развитие научных исследований в области радиоэлектроники

Журнал выполняет следующие задачи:

- предоставлять авторам возможность публиковать результаты своих исследований;
- расширять сферу профессионального диалога российских и зарубежных исследователей;
- способствовать становлению лидирующих мировых

С. Б. МАКАРОВ, д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, С.-Петербург, Россия

Л. А. МЕЛЬНИКОВ, д.ф.-м.н., проф., Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

А. А. МОНАКОВ, д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), С.-Петербург, Россия

А. А. ПОТАПОВ, д.ф.-м.н., гл.н.с., Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

Н. М. РЫСКИН, д.ф.-м.н., гл.н.с., Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов, Россия

С. В. СЕЛИЩЕВ, д.ф.-м.н., проф., НИУ "Московский институт электронной техники", Москва, Россия

А. Л. ТОЛСТИХИНА, д.ф.-м.н., гл.н.с., Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, Москва, Россия

А. Б. УСТИНОВ, д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия

В. М. УСТИНОВ, д.ф.-м.н., чл.-кор. РАН, директор, Центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, С.-Петербург, Россия

В. А. ЦАРЕВ, д.т.н., проф., Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

Н. К. ЮРКОВ, д.т.н., проф., Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Ю. В. ЮХАНОВ, д.т.н., проф., Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

С. Е. ГАВРИЛОВ, к.т.н., доц., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия

позиций ученых России в области теории и практики радиоэлектроники;

- знакомить читателей с передовым мировым опытом внедрения научных разработок;
- привлекать перспективных молодых специалистов к научной работе в сфере радиоэлектроники;
- информировать читателей о проведении симпозиумов, конференций и семинаров в области радиоэлектроники



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0



JOURNAL OF THE RUSSIAN UNIVERSITIES. RADIOELECTRONICS
IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENII ROSSII. RADIOELEKTRONIKA

Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (PI № FS77-74297 from 09.11.2018).
Subscription index in JSC "Post of Russia" catalogue is П4296
Founder and publisher: Saint Petersburg Electrotechnical University (ETU)
Founded in 1998. Issued 6 times a year.
The journal is included in RSCI (Web of Science platform), Ulrichsweb Global Serials Director, Bielefeld Academic Search Engine, Google Scholar, Library of Congress, Research4life, ResearchBib, WorldCat, The Lens, OpenAIRE.

The journal is indexed and archived in the Russian science citation index (RSCI).
The journal complies with the Budapest Open Access Initiative Declaration, is a member of the Directory of Open Access Journals (DOAJ) and Crossref.
Editorial address:
ETU, 5F Prof. Popov St., St Petersburg 197022, Russia
Tel.: +7 (812) 234-10-13
E-mail: radioelectronic@yandex.ru **RE.ELTECH.RU**
© ETU, design, 2020

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF

Alexander V. SOLOMONOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

CHAIRMAN OF THE EDITORIAL BOARD

Vladimir M. KUTUZOV, Dr Sci. (Eng.), President, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

EDITORIAL BOARD:

Dieter H. BIMBERG, PhD, Dr Phil. Nat. Dr H. c. mult., Executive Director of the "Bimberg Center of Green Photonics", Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics CAS, Changchun, China

Matthias A. HEIN, PhD, Dr Rer. Nat. Habil., Professor, Technical University, Ilmenau, Germany

Jochen HORSTMANN, PhD, Dr. Rer. Nat., Head of the Department of Radar Hydrography, Institute for Coastal Research, Helmholtz Zentrum Geesthacht, Geesthacht, Germany

Alexei KANAREYKIN, Dr Sci. (Phys.-Math.), President/CEO of Euclid TechLabs LLC, Solom, USA

Sergey T. KNYAZEV, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Erkki LAHDERANTA, PhD, Professor, Technical University, Lappeenranta, Finland

Anatolii N. LEUKHIN, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia

Sergey B. MAKAROV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Institute of Physics, Nanotechnology and Telecommunication St Petersburg Polytechnic University, St Petersburg, Russia

Ferran MARTIN, PhD (Phys.), Professor, Autonomous University, Barcelona, Spain

Leonid A. MELNIKOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

Andrei A. MONAKOV, Dr Sci. (Eng.), Professor, State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

Alexander A. POTAPOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS, Moscow, Russia

Nikita M. RYSKIN, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Saratov Branch, Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Saratov, Russia

Piotr SAMCZYNSKI, PhD, Dr Sci., Associate Professor, Warsaw University of Technology, Institute of Electronic Systems, Warsaw, Poland

Thomas SEEGER, Dr Sci. (Eng.), Professor, University of Siegen, Siegen, Germany

Sergey V. SELISHCHEV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia

Alla L. TOLSTIKHINA, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Divisional Manager, Institute of Crystallography named after A. Shubnikov RAS, Moscow, Russia

Vladislav A. TSAREV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, Russia

Aleksey B. USTINOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

Victor M. USTINOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Correspondent Member of RAS, director, Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center, RAS, St Petersburg, Russia

Aleksey G. VOSTRETSOV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Yury V. YUKHANOV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Nikolay K. YURKOV, Dr Sci. (Eng.), Professor, Penza State University, Penza, Russia

EXECUTIVE SECRETARY

Stanislav E. GAVRILOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

The journal is aimed at the publication of actual applied and fundamental research achievements in the field of radioelectronics.

Key Objectives:

- provide researchers in the field of radioelectronics with the opportunity to promote their research results;
- expand the scope of professional dialogue between Russian and foreign researchers;
- promote the theoretical and practical achievements of Russian scientists in the field of radioelectronics at the international level;

- acquaint readers with international best practices in the implementation of scientific results;
- attract promising young specialists to scientific work in the field of radioelectronics;
- inform readers about symposia, conferences and seminars in the field of Radioelectronics



All the materials of the journal are available under a Creative Commons Attribution 4.0 License

СОДЕРЖАНИЕ

Обзорные статьи

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

Винокуров С. А., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. Генераторы шума (обзор).....6

Электроника СВЧ

Ефимов А. С. Конструктивные подходы к интеграции приборов на основе разных полупроводниковых технологий в микроэлектронике СВЧ.....33

Научные статьи

Телевидение и обработка изображений

Заславский М. М., Крыжановский К. Е., Иванов Д. В. Разработка системы экологического мониторинга на базе технологий пространственной разметки и машинного зрения.....56

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

Кошкидько В. Г., Гальцов Я. О., Портных Д. А. Волноводно-щелевая антенна на основе SIW-волновода.....70

Проектирование и технология радиоэлектронных средств

Смирнова О. Н., Александров А. А., Боброва Ю. С., Моисеев К. М. Оценка размерных показателей элементов проводящего рисунка печатных плат, полученных с помощью 3D-печати81

Радиолокация и радионавигация

Грибов Г. С. Математическое моделирование пространственно-поляризационных характеристик триортогонального антенного элемента для задач пеленгования КВ-диапазона.....95

Радиофотоника

Костик Н. Р., Тарасов С. А., Айвазян Г. Е. Исследование возобновляемого потенциала Республики Армения при реализации гибридной автономной системы энергоснабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей солнечного света.....106

Метрология и информационно-измерительные приборы и системы

Назаров М. А., Семенов Э. В. Минималистичная система характеристик нелинейных видеоимпульсных устройств и ее измерение.....123

Биндер Я. И., Хазов И. А. Универсальный гироинклинометр на базе единственного одноосного датчика угловой скорости.....133

Ньямверу Б., Шишалова Е. В. Экспериментальное сравнение интерференционного и автоколлимационного нуль-индикаторов.....149

От редакции

Правила для авторов статей.....159

CONTENTS

Review articles

Radio Electronic Facilities for Signal Transmission, Reception and Processing

Vinokurov S. A., Kochemasov V. N., Safin A. R. Noise Generators (A Review).....6

SHF Electronics

Efimov A. S. Approaches to Heterogeneous Integration for Millimeter-Wave Applications.....33

Original articles

Television and Image Processing

Zaslavskiy M. M., Kryzhanovskiy K. E., Ivanov D. V. Development of an Environmental Monitoring System Based on Spatial Marking and Machine Vision Technologies.....56

Electrodynamics, Microwave Engineering, Antennas

Koshkid'ko V. G., Galtsov Ya. O., Portnykh D. A. A Substrate Integrated Waveguide Slotted Antenna.....70

Engineering Design and Technologies of Radio Electronic Facilities

Smirnova O. N., Aleksandrov A. A., Bobrova Yu. S., Moiseev K. M. Evaluation of Dimensional Characteristics of Conductive Pattern Elements of 3D-Printed Circuit Boards.....81

Radar and Navigation

Gribov G. S. Simulation of Spatial Polarization Characteristics of a Triorthogonal Antenna Element for the Tasks of HF Band Bearing.....95

Microwave Photonics

Kostik N. R., Tarasov S. A., Ayvasyan G. Ye. Study of Renewable Potential of the Republic of Armenia for Implementation of Hybrid Autonomous Power Supply System Using Solar Photovoltaic Modules.....106

Metrology, Information and Measuring Devices and Systems

Nazarov M. A., Semyonov E. V. Minimalistic System of Characteristics of Non-linear Baseband Pulse Devices and Its Measurement.....123

Binder Ya. I., Khazov I. A. Versatile Gyroclinometer Based on a Single Axis Angular Rate Sensor.....133

Nyamweru B., Shishalova E. V. Experimental Comparison of Interference and Autocollimating Null Indicators.....149

From the Editor

Author's Guide.....159

Генераторы шума (обзор)

С. А. Винокуров^{1,2,3}, В. Н. Кочемасов¹, А. Р. Сафин^{1,2,3}✉

¹ООО "Радиокомп", Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

³Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

✉arsafin@gmail.com

Аннотация

Введение. В настоящее время генераторы шума (генераторы шумовых сигналов) имеют широкий спектр применения. Например, их используют в качестве источников флуктуационных помех при исследовании предельной чувствительности радиоприемных и усилительных устройств, в качестве имитаторов сигнала многоканальной аппаратуры связи, для измерения нелинейных искажений и частотных характеристик радиоустройств с помощью анализаторов спектра.

Цель работы. Обзор мировых достижений в области разработки генераторов шума и их применений.

Материалы и методы. Отбор материала для анализа и обобщения проводился по доступным публикациям в общеизвестных технических журналах, в интернет-магазинах и на сайтах компаний-производителей генераторов шума за последние 60 лет.

Результаты. В статье представлены различные генераторы шума и их характеристики, которые в настоящее время присутствуют на рынке радиоаппаратуры. Проведен анализ основных технических характеристик этих генераторов, а также указаны примеры их практического применения.

Заключение. Генераторы шумовых сигналов имеют широкое применение в научных исследованиях, а производят их в основном зарубежные компании. Отечественные производители на сегодняшний день представлены на этом рынке слабо, а обзорная литература практически отсутствует, несмотря на большие перспективы применения. Многие российские производители начинают вести активные разработки в области создания генераторов шумовых сигналов, что позволит в дальнейшем избежать зависимости от импортной продукции.

Ключевые слова: генераторы шума, шумовой сигнал, спектральная плотность мощности шума, диапазон рабочих частот, коэффициент шума

Для цитирования: Винокуров С. А., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. Генераторы шума (обзор) // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 6–32. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-6-32

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования: грант РНФ № 21-79-10396.

Статья поступила в редакцию 11.04.2023; принята к публикации после рецензирования 12.06.2023; опубликована онлайн 28.09.2023

Noise Generators (A Review)

Sergey A. Vinokurov^{1,2,3}, Victor N. Kochemasov¹, Ansar R. Safin^{1,2,3}✉

¹"Radiocomp", Moscow, Russia

²National Research University "MPEI", Moscow, Russia

³Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Moscow, Russia

✉arsafin@gmail.com

Abstract

Introduction. At present, noise generators (noise signal generators) have a wide range of applications. For example, such devices can be used as sources of fluctuating interference when studying the limiting sensitivity of radio receivers and amplifying devices, as signal simulators of multi-channel communication equipment, as tools for measuring non-linear distortions and frequency characteristics of radio devices using spectrum analyzers with a constant bandwidth.

Aim. Review of scientific achievements in the development of noise generators and their applications.

Materials and methods. The material for analysis was collected using databases of scientific publications, online resources, and websites of noise generator manufacturers. The research spanned the timeframe of 60 years.

Results. Various noise generators and their characteristics, currently available on the radio equipment market, are described. The analysis of their main technical characteristics is carried out; examples of their practical application are indicated.

Conclusion. Noise signal generators are widely used in scientific research and are currently produced mainly by foreign companies. Domestic companies are poorly represented in this market, with little published information available. However, positive developments in this direction have recently been observed. Domestic manufacturers are launching R&D programs to develop noise signal generators, which could reduce dependence on imported products in the future.

Keywords: noise generators, noise signal, noise power spectral density, operating frequency range, noise coefficient

For citation: Vinokurov S. A., Kochemasov V. N., Safin A. R. Noise Generators (A Review). Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 6–32. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-6-32

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgment: RFBR grant no. 21-79-10396.

Submitted 11.04.2023; accepted 12.06.2023; published online 28.09.2023

Введение. Шумовой сигнал – это сигнал, мгновенное значение которого меняется во времени по случайному закону (рис. 1). Источники шума в радиоаппаратуре могут быть как внешние, так и внутренние. К внешним источникам относят сеть электропитания, радиостанции, вибрации и т. д. К внутренним источникам относят шум, возникающий в элементах устройств – активных элементах, цепях согласования и т. д. [1]. Шумовой сигнал получают на выходе генератора, в котором формируется колебание с недетерминированным изменением его временной реализации. Такие генераторы называют генераторами шумовых сигналов,

или генераторами шума (ГШ). Таким образом, ГШ представляет собой совокупность компонентов и узлов, обеспечивающих получение шумового сигнала (напряжения, тока или мощности) на нагрузке генератора [1].

Шумовой сигнал в ГШ имеет 2 механизма возникновения: тепловой и дробовой. Тепловой шум возникает в элементах цепи и зависит от их сопротивления и температуры. Дробовой шум возникает в полупроводниковых элементах и связан со случайным движением носителей заряда [2]. В основе генерации шумов лежат элементарные физические процессы (тепловое возбуждение носителей электрического

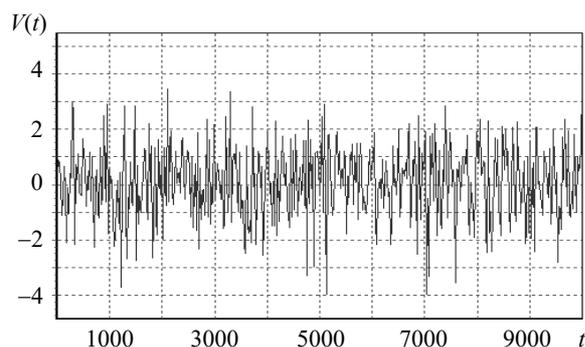


Рис. 1. Временная реализация шумового сигнала на отрезке времени

Fig. 1. Timing implementation of the noise signal in the time span

заряда, его дискретность и др.) и их комбинации. Измеряя характеристики шума, можно по ним определять ряд физических постоянных, например постоянную Больцмана, заряд электрона, подвижность носителей. Одним из методов определения электронной температуры при термоядерных экспериментах является радиоприем и оценка интенсивности ради шумов СВЧ-излучения плазмы [3].

В основе деления ГШ на классы лежат различные характеристики случайных сигналов. Рассмотрим некоторые из возможных классификаций [1]:

- по форме сигнала ГШ делятся на 2 больших класса: генераторы непрерывных (аналоговых) и генераторы дискретных (цифровых) случайных сигналов;

- по частотному диапазону генерируемых сигналов ГШ делятся: на инфранизкочастотные, низкочастотные, высокочастотные и сверхвысокочастотные;

- по ширине полосы генерируемых частот различают узкополосные и широкополосные ГШ.

По характеру спектра шумов можно разделить на 2 типа: широкополосный шум с непрерывным спектром шириной более одной октавы и тональный шум, в спектре которого имеются выраженные тона (одна из трети октавы полос частот превышает остальные не менее, чем на 10 дБ). Широкополосный шум с постоянной спектральной плотностью условно обозначают как "белый".

Кроме того, шум имеет классификацию по форме спектральной плотности мощности шума (СПМШ), обозначаемую "цветом": белый,

розовый (мерцательный), броуновский (красный), синий (голубой), фиолетовый, серый, оранжевый, зеленый и черный. Белый шум является сигнал с равномерной спектральной плотностью во всем частотном диапазоне и дисперсией, равной бесконечности. Является стационарным случайным процессом.

Розовый шум – это сигнал, спектральная плотность которого уменьшается с увеличением частоты. Такой шум можно обнаружить, например, в сердечных ритмах. Красный шум – это сигнал, спектральная плотность которого уменьшается обратно пропорционально квадрату частоты. Синий шум – это шумовой сигнал, чья спектральная плотность увеличивается на 3 дБ/окт по сравнению с красным шумом. Спектр синего шума является зеркальным отображением спектра розового шума. Фиолетовый шум – это сигнал, чья спектральная плотность увеличивается на 6 дБ/окт по сравнению с синим шумом. Серый шум – это сигнал, спектр которого имеет высокие значения на низких и высоких частотах и "провал" на средних частотах. Такой спектр можно получить при сложении спектров броуновского и фиолетового шумов.

Характеристики шумов. Помимо деления шума по спектрам, частоте и форме сигнала, он еще разделяется по плотности распределения вероятности. Распространенными видами шума по форме распределения являются: рэлеевский, гауссовский, экспоненциальный, Эрланга, импульсный и равномерный. Рассмотрим их характеристики подробнее.

Функция распределения Рэля $F(z)$ случайной величины z задается функцией (a, b – константы):

$$F(z) = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{(z-a)^2}{b}}, & z \geq a, \\ 0, & z < a. \end{cases}$$

Плотность функции распределения вероятностей шума Рэля задается выражением

$$p(z) = \begin{cases} \frac{2}{b}(z-a)e^{-\frac{(z-a)^2}{b}}, & z \geq a, \\ 0, & z < a. \end{cases}$$

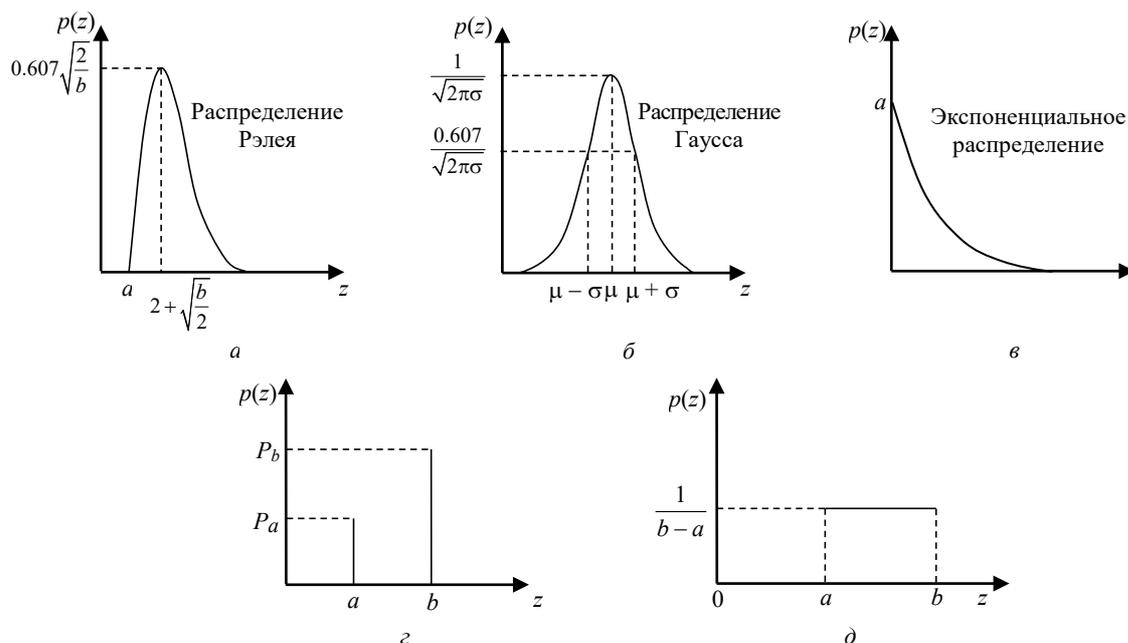


Рис. 2. Функции распределения: а – Рэлея; б – Гаусса; в – экспоненциальное; з – импульсное; д – равномерное
 Fig. 2. Distribution functions: а – Rayleigh; б – Gaussian; в – exponential; з – impulse; д – uniform

График плотности функции распределения Рэлея (рис. 2, а) имеет асимметричную форму. Математическое ожидание и дисперсия равны соответственно:

$$\mu = a + \frac{\sqrt{\pi b}}{2}; \quad \sigma^2 = \frac{b(4 - \pi)}{4}.$$

Шум, характеризующийся случайной величиной z с гауссовской функцией плотности распределения вероятности $f(z)$, имеет следующий вид:

$$f(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z - \mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где μ – математическое ожидание (среднее значение); σ – среднеквадратическое отклонение (σ^2 – дисперсия) распределения (рис. 2, б).

Функция плотности распределения вероятностей экспоненциального шума задается выражением (рис. 2, в)

$$p(z) = \begin{cases} ae^{-az}, & z \geq 0; \\ 0, & z < 0, \end{cases}$$

где $a > 0$ – константа.

Среднее значение и дисперсия для этого распределения имеют вид

$$\mu = \frac{1}{a}; \quad \sigma^2 = \frac{1}{a^2}.$$

Это распределение является частным случаем распределения Эрланга с $b = 1$. Функция плотности распределения вероятностей шума Эрланга определяется как

$$p(z) = \begin{cases} \frac{a^b z^{b-1}}{(b-1)!} e^{-az}, & z \geq 0; \\ 0, & z < 0, \end{cases}$$

где a, b – положительные целые числа.

Математическое ожидание и дисперсия для этого распределения равны:

$$\mu = \frac{b}{a}, \quad \sigma^2 = \frac{b}{a^2}.$$

Функция плотности распределения вероятностей импульсного шума (рис. 2, з) определяется выражением

$$p(z) = \begin{cases} P_a, & z = a; \\ P_b, & z = b; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Функция плотности распределения вероятностей равномерного шума (рис. 2, д) задается выражением



Рис. 3. Функциональная схема ГШ [1]

Fig. 3. Functional diagram of the noise generator (NG) [1]

$$p(z) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq z \leq b; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

При этом математическое ожидание и дисперсия равномерного распределения равны:

$$\mu = \frac{a+b}{2}; \quad \sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{12}.$$

Количественно ГШ чаще всего оценивают по коэффициенту избыточного шума ENR (excess noise ratio) – отношение эффективной температуры входного шума к абсолютной температуре:

$$\text{ENR} = \frac{T_{\text{ex}}}{T_0},$$

где T_{ex} – эффективная температура входного шума; T_0 – абсолютная температура (290 К).

Данный параметр измеряется в децибелах и используется для определения среднего уровня собственных шумов в заданной полосе или для сравнения средних уровней собственных шумов разных ГШ в одной полосе.

Генераторы шума и область их применения. ГШ отличаются исключительным разнообразием используемых при их построении элементов. Это объясняется, с одной стороны, широким выбором первичных источников шума, а с другой – исключительным многообразием практических требований к самим генераторам. При выполнении ГШ используются различные схемотехнические решения, а их детальное рассмотрение позволяет получить обобщенную функциональную схему ГШ (рис. 3).

В схему входит аттенюатор, первичный источник шума, широкополосный усилитель, формирующее устройство, калиброванный делитель или ослабитель, измеритель мощности.

Первичными источниками шума в XX в. чаще всего служили газоразрядные элементы (тиратроны, неоновые лампы, аргоновые и неоновые трубки и др.), так как они обладают большой мощностью шума в достаточно широкой полосе частот от несколько мегагерц до СВЧ-диапазона [4]. В настоящее время в качестве первичного источника используются резисторы, полупроводниковые элементы, шумовые диоды, фотоэлектронные умножители (рис. 4) и другие приборы [5].

С помощью формирующего устройства производится выделение нужного спектра частот с заданным распределением спектра мощности шума или осуществляется преобразование одного вида шума в другой, например узкополосного нормального шума в рэлеевский.

Для того чтобы сравнивать усилители, преобразователи частоты и другие устройства по минимальному коэффициенту шума, необходимо иметь возможность изменять входное сопротивление ГШ. Эту функцию в них выполняет переключатель выходного сопротивления [2].

ГШ находят различное применение в лабораторной и заводской практике. Спектральный состав шумовых сигналов на выходе ГШ, как правило, равномерен в очень широкой полосе частот [7].

Шумовые генераторы перекрывают диапазон от весьма низких частот до самых высоких,



Рис. 4. Фотоэлектронный умножитель ФЭУ-22 [6]

Fig. 4. Photomultiplier ФЭУ -22 [6]

применяемых в настоящее время. Они надежны, конструктивно просты, обладают стабильностью, удовлетворяющей требованиям практики. Они универсальны в том отношении, что позволяют в ряде частных применений с помощью сравнительно простых средств преобразовывать шумы с одним законом распределения мгновенных значений в шумы с иными законами распределения мгновенных значений или преобразовать флуктуационные сигналы с одним спектральным составом в шумовые колебания с другим частотным спектром [8].

Наибольшее применение ГШ находят в измерительных устройствах, в качестве источников, воспроизводящих шумы, которые наблюдаются в реальных схемах и системах. Примерами таких измерительных устройств могут быть многочисленные генераторы, предназначенные для измерения коэффициента шума приемников, а также систем автоматического регулирования и телеуправления, предельной дальности радиолокационных станций и радионавигационных систем [2].

ГШ используются также в качестве калиброванных источников мощности, применяемых при измерениях интенсивности других шумов или регулярных сигналов, например шумов внеземного происхождения (в радиоастрономии), атмосферных помех и др.

В радиосвязи ГШ применяются для измерения помех. В многоканальной телефонии полный сигнал на выходе модулятора очень похож на шум, занимающий ту же полосу частот, поэтому при тестировании несколько сотен источников звука заменяют одним широкополосным источником шума. Шум с исключенными составляющими спектра частот проверяемого канала подается на линию связи, а на испытываемом канале измеряется напряжение помехи. Подобные измерения производятся в проводной связи и в радиосвязи, особенно на радиорелейных линиях. Такие измерения позволили установить допустимые уровни перекрестных помех [1].

Разнообразно применение ГШ в электроакустике. В частности, в аудиометрии шумы используются для маскировки звуков при определении разборчивости речи. ГШ применяют для снятия частотных характеристик микрофонов, громкоговорителей и электроакустических

преобразователей, для измерения времени реверберации помещений, коэффициентов звукопоглощения различных перегородок, стен, звукопоглощающих материалов и др. В устройствах звукозаписи ГШ оказались полезными для установления уровней записи и воспроизведения одновременно в широком диапазоне амплитуд и частот.

В цеховой практике на радиозаводах ГШ используются для контроля действующей полосы пропускания различных радиоустройств и фильтров, непосредственного измерения коэффициента шума в процессе отладки и выпуска усилителей на лампах или транзисторах, так как коэффициентом шума определяется предельная чувствительность прибора. Коэффициент шума от одного образца прибора к другому может отличаться весьма заметным образом. Кроме того, ГШ применяются при разбраковке транзисторов, поскольку коэффициент шума полупроводникового элемента непосредственно связан с надежностью его работы. В соединении с избирательным перестраиваемым усилителем ГШ может служить источником почти синусоидальных сигналов в широком диапазоне частот [9].

В некоторых случаях ГШ могут оказаться полезными при определении условий механических резонансов системы. Постоянное стремление к проверке конструируемого оборудования в условиях, близких к реальным, заставило сконструировать и применять "шумовые" вибростенды, амплитуда вибраций которых меняется непрерывно по случайному закону, а выходной сигнал содержит в своем составе не единственный гармонический сигнал, а целый спектр сигналов, средняя суммарная мощность которых достигает нескольких десятков киловатт.

Наконец, ГШ входят как самостоятельные узлы в комбинированные измерительные приборы, в генераторы хаотических импульсных помех. Они незаменимы в биофизике при различных опытах по определению пороговых уровней зрения, слуха и др.

Хорошо известен метод измерения параметров как отдельных антенн, так и больших антенных систем с помощью источников внеземного радиоизлучения. Последние имеют относительно небольшие угловые размеры, т. е. являются практически точечными источника-

ми, и служат во время антенных измерений в качестве "вынесенных" естественных радиопередатчиков. Положение радиоисточников на небесной сфере, их движение и интенсивность известны с большой точностью. Это позволяет юстировать электрическую ось антенны, измерять ее диаграмму направленности, коэффициент усиления, эффективную площадь, шумовую температуру, коэффициент полезного действия и другие параметры [10].

При этом ГШ можно использовать в информационной безопасности как средство защиты, а также для скрытной передачи данных [11]. Один из распространенных примеров – защита от прослушивающих устройств. Для этого ГШ может быть реализован в различном виде:

- радиопередатчик, который транслирует шум в диапазоне частот передающих устройств, например как сотовый телефон, Wi-Fi и т. д.;
- устройство с динамиком, который за счет шумовых характеристик формирует звуковой шум и тем самым заглушает переговоры в помещении.

Представленный беглый перечень некоторых применений ГШ с годами будет все многообразнее и полнее. Как правило, ГШ необходимо внедрять там, где приходится иметь дело с анализом частотных характеристик. Применение шумовых генераторов позволяет автоматизировать целый ряд ручных операций электронной и радиотехнической промышленности.

Шумовые диоды. В настоящее время основным источником шума в ГШ является полупроводниковый шумовой диод, лавинно-пролетный диод (ЛПД), вакуумный шумовой диод или микросхема с источником шума и усилителем сигнала.

Полупроводниковый шумовой диод – это диод, который является источником шума с заданной плотностью спектра и с заданным диапазоном частот. Процесс ударной ионизации в

начале стадии лавинного пробоя неустойчив. Он начинается и обрывается, а после вновь начинается в тех местах перехода, где в данный момент достаточен уровень напряжения электрического поля.

Результатом неравномерной случайной генерации новых носителей заряда при ударной ионизации являются шумы.

Лавинно-пролетный диод – это полупроводниковый СВЧ-диод, в котором появление новых носителей заряда происходит за счет лавинного умножения в области перехода. При определенных условиях взаимодействие носителей с переменным полем в переходе обеспечивает возникновение отрицательного дифференциального сопротивления, что позволяет применять ЛПД для создания генераторов и усилителей.

Вакуумный диод применяется как источник дробового шума. В основном конструкция представляет собой диодную вакуумную трубку с пластиной (анод) и нагретой нитью накала, которая является катодом диода. Температура катода определяет ток анода, который задает дробовой шум. Анодное напряжение устанавливается весьма большим, чтобы собрать все электроны, испускаемые нитью накала.

Шумовые диоды серии NC100/200/300/400 фирмы NoiseCom (рис. 5, а) применяют в аудиоаппаратуре и используют в микроволно-

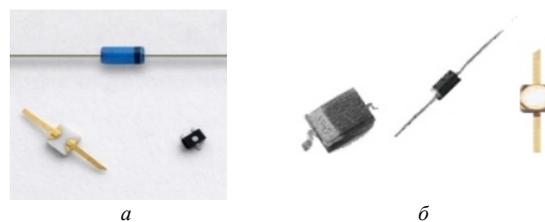


Рис. 5. Шумовые диоды: а – серии NC100/200/300/400 фирмы NoiseCom; б – серии NW100/200/300/400 фирмы NoiseWave

Fig. 5. Noise diodes: а – NC100/200/300/400 series by NoiseCom; б – NW100/200/300/400 series by NoiseWave

Табл. 1. Технические параметры шумовых диодов

Tab. 1. Technical parameters of noise diodes

Производитель	Модель	Диапазон частот
NoiseCom	Серии NC1XX	От 0.1 Гц...100 кГц до 0.1 Гц...3 МГц
NoiseCom	Серии NC2XX	От 0.1 Гц...10 МГц до 0.1 Гц...100 МГц
NoiseCom	Серии NC3XX	От 10 Гц...3 ГГц до 10 МГц...11 ГГц
NoiseCom	Серии NC4XX	От 100 МГц...18 ГГц до 1 ГГц...110 ГГц
NoiseWave	Серии NW1XX	От 0.1 Гц...100 кГц до 0.1 Гц...2 МГц
NoiseWave	Серии NW2XX	От 0.1 Гц...10 МГц до 0.1 Гц...100 МГц
NoiseWave	Серии NW3XX	От 10 Гц...3 ГГц до 10 МГц...11 ГГц
NoiseWave	Серии NW4XX	От 10 МГц...18 ГГц до 10 МГц...40 ГГц

вых приемниках (табл. 1). Импеданс сигнала серий NC300 и NC400 составляет 10...20 Ом при постоянном смещении диода [12].

Шумовые диоды NoiseWave серии NW100/200/300/400 (рис. 5, б) обеспечивают симметричное распределение напряжения белого гауссовского шума при сохранении одинаковой спектральной плотности мощности в зависимости от частотной характеристики (табл. 1). Эти диоды применяют: для испытания оборудования, увеличения динамического диапазона аналого-цифровых преобразователей, в качестве источника широкополосной мощности [13].

Шумовые диоды серии NC100/200/300/400 и NW100/200/300/400 при общем рассмотрении имеют схожую характеристику, но в каждой серии свои преимущества. Серия NC100/200/300/400 имеет большой выбор диодов, и максимальная рабочая частота достигает 110 ГГц. Серия NW100/200/300/400 имеет широкий диапазон частот (включая мега- и гигагерцовый), при этом спад показателя ENR незначителен.

Модульные генераторы шума. Модульные ГШ сквозного и поверхностного монтажа. Шумовые диоды являются неотъемлемой частью ГШ. Вместе с тем в ряде практических применений удобнее использовать модульные ГШ (рис. 6), которые, в отличие от диодов, имеют большую вариативность. Их можно разделить как по виду генерации шума, так и по типам самих модульных ГШ и диапазонам частот.

Модульный ГШ серии NC500/500SM фирмы NoiseCom (табл. 2) представлен на рис. 6, а. Шумовые модули серий NC500 (сквозной монтаж) и NC500SM (поверхностный монтаж) являются хорошим решением для тестирующих



Рис. 6. Модульные ГШ поверхностного и сквозного монтажа: а – серии NC500/500SM фирмы NoiseCom; б – серии NC2000/4000 фирмы NoiseCom и серии NW-D фирмы NoiseWave

Fig. 6. Modular NGs of surface and through-hole mounting: а – NC500/500SM series by NoiseCom; б – NC2000/4000 series by NoiseCom and series NW-D by NoiseWave

устройств. Данные модули обеспечивают чрезвычайно стабильную выходную мощность при изменении температуры и напряжения [14]. Коэффициент шума на выходе составляет 31 дБ. Области применения этих шумовых модулей включают: тестирование оборудования, измерители уровня сигнала для сотовой связи, ПК, калибраторы, анализаторы спектра, приемники радиолокационного предупреждения.

Широкополосные шумовые модули серии NC2000/4000 фирмы NoiseCom (табл. 3) представлены на рис. 6, б. Модули серии NC2000 размещены в 24 или 14 контактных корпусах [15]. Модули серии NC4000 размещены в 40-контактном модуле, который охватывает те же диапазоны шума, что и NC2000, но имеют более высокий уровень выходного сигнала.

Применения для модулей NoiseWave серии NW-D (табл. 3) включают: встроенное тестовое оборудование, сглаживание для увеличения динамического диапазона аналого-цифровых преобразователей, а также для тестирования частоты битовых ошибок [16]. Устройства поставляются в стандартных 14- или 24-контактных корпусах.

Табл. 2. Технические параметры модульных ГШ с коаксиальными соединителями

Tab. 2. Technical parameters of modular NG with coaxial connectors

Производитель	Модель	Диапазон частот, ГГц	ENR, дБ
NoiseCom	NC3404	2...4	30...36
NoiseCom	NC3405	4...8	30...35
NoiseCom	NC3406	8...12	28...33
NoiseCom	NC3407	12...18	26...32
Narda-ATM	NX1502R	0.01...1.6	-15.5
Narda-ATM	NX3202S	–	22
Narda-ATM	Серии NX1500X	От 1...2 до 12...18	-15.5
Narda-ATM	Серии NX3212Y	–	26...35

Табл. 3. Технические параметры модульных ГШ

Tab. 3. Technical parameters of modular NG

Производитель	Модель	Диапазон частот	Мощность, дБм	Допустимое отклонение коэффициента шума на выходе, дБ
NoiseCom	Серии NC5XX	200 кГц...5 ГГц	5	±3.0
NoiseCom	NC2201	100 Гц...20 кГц	5	±0.75
NoiseCom	NC2401	1 МГц...500 МГц	0	±1.0
NoiseCom	NC2601	1 МГц...2 ГГц	-5	±2.0
NoiseWave	NW100M-D	1 МГц...100 МГц	5	±1.0
NoiseWave	NW300M-D	10 МГц...300 МГц	0	±1.0
NoiseWave	NW3G-D	10 МГц...3 ГГц	-5	±2.0

Модульные ГШ серий NC500/500SM, NC2000/4000 и NW-D при общем рассмотрении имеют схожие параметры, но в каждой серии свои преимущества и недостатки. Серия NC500/500SM имеет большой выбор устройств и широкий диапазон частот, максимальная рабочая частота достигает 5 ГГц, но наблюдается более высокая погрешность. Серия NC2000/4000 имеет неплохой диапазон частот с более низкой погрешностью, но обладает малой плотностью шума. Серия NW-D имеет более высокую плотность шума, относительно малую погрешность и обладает достаточно широким диапазоном, но максимальная рабочая частота не превышает 3 ГГц.

Модульный ГШ с коаксиальными соединителями. Модульные ГШ NoiseCom серии NC3400 (см. табл. 2) являются экранированными ГШ и применяются для радиометрических и радиолокационных систем (рис. 7, а). Точность калибровки ГШ серии NC3400 повышается благодаря низкому коэффициенту стоячей волны по напряжению (КСВН), равному 1.3:1 [17]. Встроенный изолятор обеспечивает почти постоянное выходное сопротивление при

включении и выключении смещения источника шума. Соединитель SMA является стандартным для радиочастотного выхода, а соединитель BNC – стандартным для входа смещения.

Модульные ГШ Narda-ATM серии NX150X и NX320X (см. табл. 2) обеспечивают белый шум с гауссовским распределением вероятности для радиочастотных систем (рис. 7, б). Они обладают долговременной стабильностью, надежностью и могут работать в широком диапазоне температур [18]. Изделие Narda-ATM представляет собой генератор микроволнового шума, который может использоваться в различных приложениях, включая измерение уровня



Рис. 7. Модульные ГШ с коаксиальными соединителями: а – серии NC3400 фирмы NoiseCom; б – серии NX1500 и NX3200 фирмы Narda-ATM

Fig. 7. Modular NG with coaxial connectors: а – NC3400 series from NoiseCom; б – NX1500 series and NX3200 from Narda-ATM

Табл. 4. Технические параметры модульных ГШ

Tab. 4. Technical parameters of modular NG

Производитель	Модель	Диапазон частот	ENR, дБ
Micronetics Wireless	Серии CI6XX	От 1.20...1.40 до 6.90...7.80 ГГц	28.0...36.0
Micronetics Wireless	Серии CI7XX	От 7.50...9.00 до 8.40...10.00 ГГц	36.0
Micronetics Wireless	Серии CI8XX	От 8.50...9.60 до 11.50...12.40 ГГц	36.0
Micronetics Wireless	Серии CI901	От 1.50...2.00 до 8.00...12.40 ГГц	32.0...36.0
NoiseWave	NW2G-30-CS	10 кГц...2 ГГц	30
NoiseWave	NW3G-15-CS	100 кГц...3 ГГц	30
NoiseWave	NW6G-26-CS	10 МГц...6 ГГц	26
NoiseWave	NW18G-23-CS	1 ГГц...18 ГГц	23
NoiseWave	NW18G40-22-CS	18 ГГц...40 ГГц	22
Micronetics Wireless	NMA-2413	10 МГц...4 ГГц	78
Micronetics Wireless	NMA-2414	100 МГц...6 ГГц	74
Micronetics Wireless	NMA-2415	30 МГц...3 ГГц	78
Micronetics Wireless	NMA-2416	7.8 ГГц...8.5 ГГц	74
Micronetics Wireless	NMA-2417	2 ГГц...8.0 ГГц	74

шума, подавление помех в военных целях и самотестирование радаров и других систем.

Линейку модульных ГШ серии C16XX/7XX/8XX/9XX производит компания Micronetics Wireless (табл. 4). Эти серии ГШ включают узкополосные и широкополосные устройства как в коаксиальной (C16XX, C17XX и C18XX), так и в волноводной (C19XX) конфигурациях [19]. Миниатюрный размер, быстрое время переключения и прочная конструкция делают их хорошо подходящими для встроенного тестового применения в радиолокации, авионике, радиоастрономии, электронных средствах противодействия и системах связи.

Модульные ГШ Ceuear серии 1660X обладают преимуществами: широким спектром частот от 10 МГц до 50 ГГц, малым КСВН, равным 1.30:1 [20]. Они оснащены цифровым датчиком температуры, удобны для автоматического мониторинга изменения температуры окружающей среды и используются для коррекции температуры при измерении показателя шума и повышения точности измерений (рис. 8, а). Источник шума и анализатор уровня шума используются вместе, чтобы обеспечить комплексное решение для измерения уровня шума на микроволновых частотах миллиметровых волн.

Модульные ГШ NoiseWave серии NW-CS – это широкополосные модульные ГШ (табл. 4), идеально подходящие для измерения уровня шума и различных встроенных тестовых приложений (рис. 8, б). Эти продукты отличаются высокой выходной мощностью [21].

Модульные ГШ Rohde & Schwarz серии R&S®FS-SNS (рис. 8, в) применяются для измерения уровня шума и усиления. Точность измерения обеспечивается за счет сохранения необходимых параметров для измерений, их загрузки, а также учета температуры окружа-

ющей среды, которая способна повлиять на исследуемые параметры. Погрешность измерения ГШ способна вычислить в автоматическом режиме и вывести результат на подключенный экран монитора. ГШ работает в диапазоне частот от 10 МГц до 110 ГГц, а показатель ENR варьируется в диапазоне от 5 до 21 дБ [22].

Модульные ГШ Keysight Technologies серии 346X (рис. 8, г) являются широкополосными ГШ с малой погрешностью. Диапазон частот от 10 МГц до 26.5 ГГц, ENR варьируется от 4.5 до 17 дБ. Применяются для измерения коэффициента шума. За счет широкого диапазона частот эти ГШ позволяют выполнить измерения в разных полосах частот без использования нескольких ГШ [23].

ГШ ERAVANT модели STZ-08-01 представляет собой источник шума, который обеспечивает номинальный уровень ENR 14 дБ в диапазоне частот от 90 до 140 ГГц. Источник шума может работать как в непрерывном, так и в импульсном режимах [24].

Шумовой модуль Micronetics Wireless серии NMA-24XX (табл. 4) идеально подходит для таких применений, как подавление помех и встроенные тесты, где требуются высокая мощность и небольшие размеры [25]. Встроенный регулируемый драйвер обеспечивает долговременный высокостабильный уровень шума.

Модульные ГШ с коаксиальными соединителями серии NC3400, NX150X, NX320X, C16XX/7XX/8XX/9XX, 1660X, NW-CS и NMA-24XX при общем рассмотрении имеют множество отличительных параметров, но в каждой серии можно выделить свои преимущества и недостатки. Серия NC3400 имеет самую малую погрешность, но обладает не таким широким диапазоном частот. Серии NX150X и NX320X имеют схожие параметры,



Рис. 8. Модульные ГШ с коаксиальными соединителями: а – серии 1660X фирмы Ceuear; б – ГШ серии NW-CS фирмы NoiseWave; в – серии R&S®FS-SNS фирмы Rohde & Schwarz; г – серии 346X фирмы Keysight Technologies

Fig. 8. Modular NG with coaxial connectors: а – 1660X series from Ceuear; б – NW-CS series NG from NoiseWave; в – R&S®FS-SNS series from Rohde & Schwarz; г – 346X series from Keysight Technologies

Табл. 5. Технические параметры волноводных ГШ

Tab. 5. Technical parameters of waveguide NG

Производитель	Модель	Диапазон частот, ГГц	ENR, дБ
NoiseCom	NC5242A	18...26.5	25
NoiseCom	NC5428A	26.5...40	6
NoiseCom	NC5222A	33...50	21
NoiseCom	NC5115A	50...75	15.5
NoiseCom	NC5112A	60...90	15
NoiseCom	NC5110A	75...110	15
Farran Technology	WG-NS-28	26.5...40	15
Farran Technology	WG-NS-22	33...50	14
Farran Technology	WG-NS-19	40...60	13
Farran Technology	WG-NS-15	50...75	13
Farran Technology	WG-NS-12	60...90	13
Farran Technology	WG-NS-10	75...110	12
Farran Technology	WG-NS-08	90...140	12
Farran Technology	WG-NS-06	110...170	12
СКАРД	МН2640	26...40	15...16
СКАРД	МН3350	33...50	15...16
СКАРД	МН4060	40...60	15...17
СКАРД	МН5075	50...75	14...17

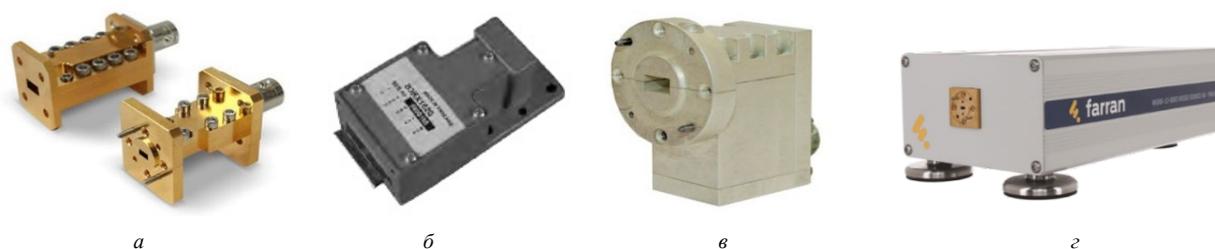


Рис. 9. Волноводные генераторы шума: а – серии NC5XXXX фирмы NoiseCom; б – серии В3NG16 фирмы Teledyne e2v; в – серии МН фирмы СКАРД; г – серии WG-NS фирмы Farran Technology

Fig. 9. Waveguide noise generators: а – NC5XXXX series from NoiseCom; б – series В3NG16 from Teledyne e2v; в – МН series from SCARD; г – WG-NS series by Farran Technology

малый шаг перестройки частоты. Серия С16XX/7XX/8XX/9XX обладает большим выбором устройств и стабильным значением ENR. Серия 1660X имеет большой диапазон частот, и максимальная рабочая частота достигает 50 ГГц. Серия NW-CS имеет широкий диапазон частот, но более высокую погрешность. У серии NC2000/4000 неплохой диапазон частот и более низкая погрешность. Серия NMA-24XX обладает большим значением ENR, высокой плотностью шума, но имеет большую погрешность.

Волноводные ГШ. Волноводные ГШ серии NC5XXXX от NoiseCom (табл. 5) отличаются высокой стабильностью и скоростью переключения, отсутствием паразитных пульсаций (рис. 9, а). Пульсации на выходе источников шума оказывают прямое влияние на точность измерений, поэтому NoiseCom адаптировала характеристики серии NC5XXXX таким обра-

зом, чтобы пульсации были минимизированы во всем диапазоне частот [26].

Модульные ГШ Teledyne e2v серии В3NG16 имеют диапазон частот от 8.8 до 9.5 ГГц с коэффициентом шума на выходе 15 дБ [27]. Такие ГШ также могут использоваться в качестве датчиков мощности для обеспечения контроля системы (рис. 9, б).

Волноводные ГШ Российской компании СКАРД серии МН (рис. 9, в) предназначены для проверки работоспособности и проведения калибровки СВЧ-трактов приемных каналов (табл. 5), малошумящих усилителей и преобразователей частоты в миллиметровом диапазоне длин волн [28].

Источники шума Farran Technology серии WG-NS (рис. 9, г) обеспечивают равномерный уровень плотности мощности шума во всем диапазоне частот волновода (табл. 5). Источники доступны в восьми волноводных диапазо-

нах, охватывающих частоты 26.4...170 ГГц [29]. В качестве основного источника шума здесь используется кремниевый лавинный диод. Высокая стабильность устройств позволяет использовать их для испытаний и контрольно-измерительных приборов. Низкие требования к питанию постоянным током устраняют необходимость в сложных источниках питания высокого напряжения.

Волноводный ГШ Keysight Technologies серии Q347B работает в диапазоне частот от 33 до 50 ГГц, ENR варьируется от 9 до 17 дБ. Применяется для измерения коэффициента шума и усиления. ГШ обеспечивает подачу высокоточного широкополосного шума и высокую временную стабильность ENR, что позволяет получить более точные измерения [30].

ГШ ERAVANT модели STZ-19-11 представляет собой волноводный источник шума на основе кремниевого ИМПАТТ-диода. Номинальный уровень ENR равен 13 дБ, диапазон частот от 40 до 60 ГГц. Источник шума интегрирован с изолятором Фарадея для улучшения КСВН, что обеспечивает более надежное и точное измерение уровня шума [31].

ГШ ERAVANT модели STZ-22-11 представляет собой волноводный источник шума в диапазоне частот от 33 до 50 ГГц, который обеспечивает ENR, равный 13 дБ. Источник шума интегрирован с высококачественным изолятором Фарадея SAGE Millimeter (STF-22-S1) для улучшения КСВН для более надежных и точных измерений уровня шума. Источник шума может работать как в непрерывном, так и в импульсном режимах. Эта функция также может быть использована в автоматических тестовых системах для удаленного включения и выключения источника шума [32].

Волноводные ГШ серий NC5XXXA, B3NG16, МН и WG-NS при общем рассмотрении имеют множество отличительных парамет-

ров, но в каждой серии можно выделить свои преимущества. Серия NC5XXXA имеет большой выбор устройств, но обладает относительно высокой погрешностью и большим разбросом значений параметра ENR. Серия B3NG16 имеет малый шаг перестройки и малую погрешность, но весьма узкий диапазон частот. Серия МН обладает более стабильным значением ENR при достаточно неплохом диапазоне частот. Серия WG-NS имеет максимальную рабочую частоту в 170 ГГц, широкий диапазон частот и относительно небольшую погрешность, но обладает большими габаритами и массой.

Модульные генераторы шума повышенной мощности. Модульные ГШ повышенной мощности имеют большее значение амплитуды выходного сигнала по сравнению с обычными шумовыми модулями. Увеличение параметров амплитуды происходит за счет усилителя, который встроен в корпус модульного ГШ. Данное усиление необходимо в случае широкого диапазона шума, так как мощность выходного сигнала широкополосного генератора имеет недопустимо малое значение.

Модульные ГШ NoiseCom серии NC11XX и NC11XXA (рис. 10, а) генерируют шум мощностью до +13 дБм и имеют полосу пропускания до 18 ГГц (табл. 6). Модули высокой мощности предназначены для проверки помехоустойчивости оборудования кабельного те-

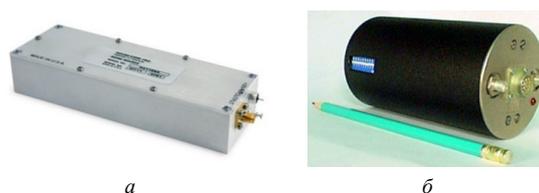


Рис. 10. Модульные генераторы шума повышенной мощности: а – серии NC11XX и NC11XXA фирмы NoiseCom; б – серии PNS-XX фирмы ELVA-1

Fig. 10. Modular noise generators of increased power: а – NC11XX and NC11XXA series from NoiseCom; б – PNS-XX series by ELVA-1

Табл. 6. Технические параметры модульных ГШ повышенной мощности

Tab. 6. Technical parameters of high-power modular NG

Производитель	Модель	Диапазон частот
NoiseCom	Серии NC11XX	От 10 Гц...20 кГц до 100 Гц...1 ГГц
NoiseCom	Серии NC11XXA	100 Гц...18 ГГц
ELVA-1	PNS-28	26.6...40 ГГц
ELVA-1	PNS-10	75...110 ГГц
ELVA-1	PNS-08	90...120 ГГц
ELVA-1	PNS-06	120...140 ГГц

левидения, защищенных каналов связи и военных систем подавления помех. Модули с меньшей выходной мощностью (≤ 0 дБм) являются источниками случайного дрожания [33], которое также применяется при тестировании оборудования.

Модульные ГШ ELVA-1 серии PNS-XX (рис. 10, б) используют специально разработанные кремниевые лавинные диоды, работающие в импульсном режиме (табл. 6). Они обеспечивают реальное некогерентное излучение в пределах полосы пропускания 5 ГГц [34]. Уровень выходной мощности 1 Вт позволяет использовать устройство для подсветки целей и повышения чувствительности пассивных радиометров. Источники доступны для всех частот от 26 до 140 ГГц. Низкие требования ГШ к питанию постоянным током устраняют необходимость в сложных источниках питания высокого напряжения. Устройства снабжены источниками импульсного тока. Предусмотрены как внешние, так и внутренние режимы запуска. Встроенный генератор с цифровым управлением позволяет устанавливать частоту повторения в диапазоне от 10 Гц до 100 кГц.

Модульные ГШ повышенной мощности серий NC11XX, NC11XXA и PNS-XX при общем рассмотрении имеют множество отличительных параметров, но в каждой серии можно выделить преимущества. Серии NC11XX и NC11XXA имеют большой диапазон частот (от герц до гигагерц), большой выбор устройств, а также более высокую плотность шума, но обладают относительно большой погрешностью и относительно малой максимальной рабочей частотой. Серия PNS-XX обладает большим диапазоном частот в области гигагерц и имеет относительно малую погрешность.

Калиброванные генераторы шума. Калиброванные ГШ имеют точную регулировку выходного сигнала и, кроме того, обладают высокой стабильностью коэффициента шума на выходе во всем рабочем диапазоне частот. Такие модульные ГШ применяются для измерения шумовых характеристик радиоаппаратуры. Это происходит за счет особенности калиброванного ГШ, которая позволяет убрать зависимость от точных вольтметров и фильтров.

Модульные ГШ серии NC3000 фирмы NoiseCom (табл. 7) обеспечивают высокую стабильность при изменениях температуры и напряжения [35]. Они хорошо подходят для тестирования приемников, измерения уровня шума и любых приложений, требующих широкой полосы пропускания и быстрого переключения.

Серия NC3000 включает в себя ГШ NC3100 с выходной мощностью избыточного коэффициента шума 15 дБ для измерителей уровня шума, а также источники шума высокой мощности серии NC3200 с коэффициентами шума от 26 до 35 дБ для тестирования систем радиолокации и спутниковой связи (рис. 11, а).

Калиброванные ГШ ELVA-1 серии ISSN-XX (рис. 11, б) обеспечивают равномерный уровень спектральной плотности мощности



Рис. 11. Калиброванные генераторы шума: а – серии NC3000 фирмы NoiseCom; б – серии ISSN-XX фирмы ELVA-1

Fig. 11. Calibrated noise generators: а – NC3000 series from NoiseCom; б – ISSN-XX series

Табл. 7. Технические параметры калибровочных ГШ

Tab. 7. Technical parameters of calibration NG

Производитель	Модель	Диапазон частот, ГГц	ENR, дБ
NoiseCom	Серии NC3100	От 0.01...8 до 0.5...18	15.5
NoiseCom	Серии NC3200	От 0.01...1 до 2...110	15...35
ELVA-1	Серии ISSN-XX	26.6...170	15...12
NoiseWave	NW2.7G3.1-30-CS-I	2.7...3.1	30...35
NoiseWave	NW3.7G4.2-30-CS-I	3.7...4.2	30...35
NoiseWave	NW5.4G5.9-30-CS-I	5.4...5.9	30...35
NoiseWave	NW7.2G8.4-30-CS-I	7.2...8.4	30...35
NoiseWave	NW10.7G12.7-30-CS-I	10.7...12.7	30...35
NoiseWave	NW17.7G21.2-32-CS-I	17.7...21.2	32...37
NoiseWave	NW27G30-32-CS-I	27...30	32...37

шума во всем диапазоне частот волновода [36]. Такие ГШ доступны в восьми волноводных диапазонах, охватывающих частоты 26.4...170 ГГц (табл. 7).

В качестве основного элемента в ГШ используются кремниевые лавинные диоды. Низкие требования к питанию постоянным током устраняют необходимость в сложных источниках питания высокого напряжения. Устройства могут работать в непрерывном и импульсном режимах АМ с частотой модуляции до 1 кГц.

Калиброванные ГШ NoiseWave серии NW-CS-I – это широкополосные источники шума (табл. 7), идеально подходящие для измерения уровня шума и различных встроенных тестовых приложений [37].

Калиброванные ГШ серий NC3000, ISSN-XX и NW-CS-I при общем рассмотрении имеют множество отличительных параметров, но в каждой серии можно выделить преимущества и недостатки. Серия NC3000 имеет большой диапазон частот, большой выбор устройств, но обладает не лучшим параметром погрешности. Серия ISSN-XX имеет максимальную частоту работы в 170 ГГц, но обладает относительно большой погрешностью. Серия NW-CS-I имеет малую погрешность и широкий диапазон, но максимальная частота работы достигает 30 ГГц, а также не покрывает весь диапазон частот от 1.4 до 30 ГГц.

Генераторы шума в приборном исполнении. Модульные ГШ имеют широкий спектр применений, но не всегда удобны в использова-

нии, например при быстром проведении лабораторных испытаний. В этих случаях используются ГШ в приборном исполнении. В ГШ для создания шумовых сигналов применяют шумовые диоды или модульные ГШ. Приборным ГШ в лабораторных условиях удобнее управлять и регулировать выходную мощность сигнала. Такие ГШ применяют для внешнего подключения к стендам и лабораторным установкам.

С цифровым управлением. Управление выходными параметрами ГШ в приборном исполнении с цифровым управлением происходит при помощи сенсорного дисплея или кнопок на передней панели корпуса изделия. Через сенсор или кнопки электронный сигнал поступает на плату управления изделия. От этой платы, в зависимости от поступивших сигналов, идет изменение параметров ГШ и вывод информации о параметрах генератора на цифровой экран изделия. ГШ с цифровым управлением имеет программное обеспечение.

Приборы NoiseCom серии PNG7XXXX (табл. 8) генерируют белый гауссовский шум (рис. 12, а). Выходная мощность сигнала равняется 3 дБм, а допустимое отклонение составляет ± 0.25 дБ на 40 МГц [38].

ГШ NoiseCom серии CNG-EbNo – это полностью автоматизированные приборы (табл. 8), которые устанавливают и поддерживают высокоточное соотношение между несущей (рис. 12, а) и добавленным шумом в широком диапазоне уровней мощности сигнала и частот [39]. CNG-EbNo предоставляют инженерам-

Табл. 8. Технические параметры ГШ в приборном исполнении

Tab. 8. Technical parameters of NG in the instrument version

Производитель	Модель	Диапазон частот
NoiseCom	Серии PNG7XXXX	10 МГц...2 ГГц
NoiseCom	Серия J7XXXX	10 МГц...30 ГГц
NoiseCom	Серии CNG-EbNo	50 МГц...22 ГГц
NoiseCom	Серия UFX7XXXX	10 Гц...1 ГГц



а



б

Рис. 12. Генератор шума в приборном исполнении с цифровым управлением: а – серии PNG7XXXX, CNG-EbNo, JV9XXX и J7XXXX фирмы NoiseCom; б – серии CNG фирмы dBm

Fig. 12. Noise generator in instrument design with digital control: а – PNG7XXXX, CNG-EbNo, JV9XXX and J7XXXX series from NoiseCom; б – CNG series by dBm

системщикам, проектировщикам и испытателям в области сотовой, персональной, спутниковой и военной связи экономически эффективные средства за счет автоматизированного тестирования, а также повышения уверенности в повторяемости и точности результатов тестирования.

Приборы серии JV9XXX компании NoiseCom (см. рис. 12, а) представляют собой генераторы, разработанные для подачи сигналов шума и детерминированного джиттера на линию подачи питания [40]. Встроенный в изделия ГШ обеспечивает мощность широкополосного шума на уровне 0 дБм или более в диапазоне от 500 Гц до 2 ГГц с ослаблением до 127 дБ, регулируемым с шагом 0.1 дБ. Все функции управления выполняются с помощью интерфейса, отображаемого на сенсорном экране. Несколько таких генераторов также могут устанавливаться в одном блоке. Генераторы JV9XXX компании NoiseCom могут быть дополнительно оборудованы одним или несколькими вспомогательными входами, позволяющими подавать на линию питания внешние нестандартные сигналы.

ГШ серии J7XXXA от NoiseCom (см. рис. 12, а) выдают на выходе шумовые колебания (табл. 8). Эти приборы используются разработчиками серийных данных и инженерами по производственным испытаниям для выполнения требований к тестированию на дрожание [41].

Приборы серии UFX7XXXA от NoiseCom (см. табл. 8) вырабатывают широкополосный гауссовский шум в достаточно широких пределах изменения управляющих параметров [42]. Стандартные модели генерируют колебания в различной полосе частот и уровня выходной мощности.

ГШ модели 2007 от CROSS TECHNOLOGIES обеспечивают шумовой сигнал в диапазоне от 52 до 88 МГц с шагом 0.1 дБ [43]. Широкополосный шум поступает на прецизионные аттенюаторы, управляемые кнопочными переключателями "вверх" и "вниз" на передней панели через микропроцессорный контроллер. Экран на передней панели отображает соотношение сигнал/шум или ослабление шума от уровня. Полосовые фильтры выбираются с помощью встроенных переключателей для ограничения диапазона шума на частоте 70 МГц. Модели 2007 оснащены красным светодиодом на передней панели, который загора-

ется, если температура окружающей среды выходит за пределы диапазона температур от 15 до 40 °С. Желтый светодиод на передней панели указывает на удаленное управление.

Широкополосные ГШ модели TAS420 от Telecom Analysis Systems генерируют точные, запрограммированные пользователем уровни аддитивного белого гауссовского шума, что используется для разработки, характеристики и тестирования современного оборудования связи [44]. TAS420 генерируют шумовые колебания в диапазоне от 10 МГц до 1 ГГц с коэффициентом шума на выходе 15.5 дБ. Допустимое отклонение составляет ± 0.25 дБ.

ГШ фирмы dBm серии CNG – это полностью автоматизированные ГШ, которые устанавливают и поддерживают высокоточное соотношение между входным сигналом и генерируемым шумом (см. рис. 12, б). Прибор работает в широком диапазоне уровней мощности. Модульная конструкция обеспечивает 1 или 2 полностью независимых канала с частотой от 50 до 2700 МГц [45]. Модели CNG корректируют плотность шума и колебания уровня сигнала по частоте и интегрируют фактическую мощность шума в заданной пользователем полосе пропускания сигнала.

ГШ серии АКПП-3501 фирмы Shijiazhuang Suin Instruments Co., Ltd применяются в качестве генератора шумового сигнала с равномерным спектром и нормальным распределением мгновенных значений напряжения. Выходной шум имеет характеристику гауссовского белого шума за счет источника теплового шума и промежуточного усилителя. ГШ АКПП-3501 также предназначены для моделирования шума спутниковой связи, имитации гауссовского белого шума в области СВЧ-радиосвязи и моделирования РЭА. Серия работает в диапазоне от 15 до 1800 МГц с максимальным выходным уровнем 2 дБм [46].

ГШ в приборном исполнении с цифровым управлением серий PNG7XXXA, CNG-EbNo, JV9XXX, J7XXXA, UFX7XXXA, модель 2007, TAS420 и CNG при общем рассмотрении имеют множество отличительных параметров, но среди них можно выделить преимущества. Серия PNG7XXXA имеет малую погрешность при относительно небольшом диапазоне. У се-

рии J7XXXA широкий диапазон частот при относительно большой плотности шума и небольшой погрешности. Серия UFX7XXXA имеет большой диапазон частот, максимальную частоту работы 40 ГГц, большую плотность шума, но относительно высокую погрешность. Остальные серии генераторов обладают весьма узкими диапазонами частот и малым шагом перестройки частоты.

С аналоговым управлением. Устройства с аналоговым управлением имеют более быструю настройку параметров, в отличие от ГШ с цифровым управлением. Это происходит за счет того, что в ГШ с аналоговым управлением нет платы управления и изменение выходных параметров происходит за счет прямого изменения номиналов элементов схемы генератора. Зачастую это реализовано конденсатором переменной емкости. Изменение емкости конденсатора происходит при помощи вращающейся ручки на внешней панели изделия. Такие ГШ не имеют какого-либо программного обеспечения.

ГШ NoiseCom серии NC6XXX/8XXXA с аналоговым управлением (табл. 9) предназначены для общего применения широкополосного шума на стенде либо в составе стоечной испытательной станции (рис. 13, а). Аналоговое управление облегчает работу в условиях ограниченного испытательного времени [47].



Рис. 13. Генераторы шума в приборном исполнении с аналоговым управлением: а – серии NC6XXX/8XXXA фирмы NoiseCom; серии PE85N1018 фирмы Pasternack Enterprises; б – серии ANG фирмы Atlantic Microwave

Fig. 13. Instrumental noise generators with analog control: а – NC6XXX/8XXXA series from NoiseCom; PE85N1018 series from Pasternack Enterprises; б – Atlantic Microwave ANG series

Табл. 9. Технические параметры приборных ГШ с ручным управлением

Tab. 9. Technical parameters of instrumental NG with manual control

Производитель	Модель	Диапазон частот	Мощность, дБм	Допустимое отклонение, дБ
NoiseCom	NC6110A	100 Гц...1.5 ГГц	+10	±2
NoiseCom	NC6128A	10 МГц...10 ГГц	-17	±3.5
NoiseCom	NC6226A	2 ГГц...26.5 ГГц	-20	±3
NoiseCom	NC8110A	2 МГц...500 МГц	+30	±2.0
NoiseCom	NC8111A	5 МГц...1 ГГц	+30	±2.5
NoiseCom	NC8112A	1 ГГц...2ГГц	+30	±2.5

Модель PE85N1018 – это калиброванный ГШ от Pasternack Enterprises, который работает в диапазоне частот от 10 МГц до 3 ГГц (рис. 13, а). Этот прибор генерирует уровень выходной мощности 0 дБм при отклонении ±2.5 дБ [48]. Данный ГШ оснащен управляемым вручную поворотным аттенуатором на 10 дБ с шагом регулировки 1 дБ, что упрощает эксплуатацию. Прибор включает в себя прецизионный источник шума, усилитель, аттенуатор и источник питания и выдает симметричный сигнал белого гауссовского шума. ГШ может быть использован как на стенде, так и на стоечной испытательной станции. Идеально подходит для приложений, которые включают тестирование системной и компонентной беспроводной связи, имитацию сигнала, тестирование HDTV и CATV.

ГШ Atlantic Microwave серии ANG обеспечивают генерацию белого гауссовского шума мощностью до 1 Вт в нескольких моделях в диапазоне частот от 10 Гц до 18 ГГц (рис. 13, б) и применяются либо в качестве лабораторных приборов, либо в качестве встроенных системных тестовых установок [49].

ГШ в приборном исполнении с аналоговым управлением серий NC6XXX/8XXXA, PE85N1018 и ANG при общем рассмотрении имеют множество отличительных параметров, но в каждой серии можно выделить преимущества и недостатки. Серия NC6XXX/8XXXA имеет большой диапазон частот, большой выбор устройств, максимальную рабочую частоту 26.5 ГГц, но обладает относительно большой погрешностью. Серия PE85N1018 имеет небольшой диапазон частот с малым шагом перестройки частоты, но высокую погрешность. Серия ANG имеет большой диапазон частот с относительно низкой погрешностью.

Цифровые генераторы шума. Помимо ГШ с непрерывной генерацией шумового сигнала при помощи шумового диода или модульного ГШ существуют цифровые (дискретные)



Рис. 14. Цифровые генераторы шума: а – серии RNG фирмы Atlantic Microwave; б – серии UFX7000B фирмы NoiseCom; в – серии DNG7500 фирмы NoiseCom; г – серии VXI7000 фирмы NoiseCom

Fig. 14. Digital noise generators: а – Atlantic Microwave RNG series; б – UFX7000B series by NoiseCom; в – DNG7500 series by NoiseCom; г – VXI7000 series by NoiseCom

решения. ГШ формируется за счет программной реализации математической модели шума. Такой шум не может в полной мере воспроизвести реальный случайный шум, так как реализация является дискретной или псевдослучайной. Но при помощи сложной математической модели можно реализовать более смешанный по структуре шум, состоящий из несколько видов шумов. Цифровые ГШ имеют лишь цифровое управление.

ГШ Atlantic Microwave серии RNG (рис. 14, а), управляемые через Ethernet, создают белый гауссовский шум мощностью до 1 Вт в нескольких моделях в диапазоне частот от 10 Гц до 18 ГГц и предназначены для использования либо в качестве лабораторных приборов, либо в качестве встроенных системных тестовых установок (табл. 10). Управление уровнем выходной мощности сигнала происходит с помощью удаленного графического интерфейса, т. е. при помощи локальной вычислительной машины с программным обеспечением, либо при помощи элементов управления на передней панели самого устройства [50].

Цифровой ГШ NoiseCom серии UFX7000B (рис. 14, б) оснащен мощным одноплатным

компьютером с гибкой архитектурой, используемым для создания сложных пользовательских шумовых сигналов для продвинутых тестовых систем (табл. 10) [51]. Прецизионные компоненты обеспечивают высокую выходную мощность, а гибкая компьютерная архитектура позволяет управлять несколькими аттенюаторами, переключателями и блоками фильтров.

ГШ NoiseCom DNG7500 синтезирует псевдослучайный шум и немодулированный сигнал для радиочастотных, сверхвысокочастотных и цифровых приложений (рис. 14, в). Данная модель генерирует шум в диапазоне от 500 кГц до 70 МГц [52]. Большой цветной дисплей с диагональю 8.4 дюйма содержит таблицы значений параметров сигналов, что способствует наглядности и повышает эффективность создания и хранения временных реализаций сигнала. Характеристики сигналов могут быть доведены до пределов необходимой полосы при помощи дополнительного гетеродина и частотного преобразователя. Созданные пользователем файлы данных формата MATLAB могут импортироваться для цифрового преобразования с последующим выводом в виде аналогового сигнала. Дополнительный двухканальный выход обес-

Табл. 10. Технические параметры цифрового ГШ

Tab. 10. Technical parameters of digital NG

Производитель	Модель	Диапазон частот	Выходная мощность, дБм	Допустимое отклонение, дБ
Atlantic Microwave	Серия RNG	10 Гц...1 ГГц	0...+30	±0.8...±3.0
NoiseCom	Серия UFX7000B	10 Гц...1 ГГц	-17...+30	±0.5...±4.0
NoiseCom	Серия VXI7000	10 Гц...40 ГГц	-20...+13	±0.5...±4.0

печивает возможность построения автоматизированных испытательных систем.

Приборы NoiseCom серии VXI7000 (рис. 14, *з*) содержат источник шума с усилением (табл. 10). Усилитель оптимизирован для получения выходного сигнала с гауссовским распределением амплитуды. Уровень выходной мощности шума можно регулировать от 0 до 127 дБ с шагом 1 дБ (и опционально 0.1 дБ). Уровень мощности выходного колебания контролируется радиочастотным переключателем [53].

Цифровой ГШ Boonton NGX1000 – это широкополосный генератор гауссовского белого шума. Работает в диапазоне частот от 10 МГц до 3 ГГц с равномерным распределением по всему диапазону частот, максимальная выходная мощность равна 10 дБм, а плотность шума варьируется от –77 до –95 дБм. Настройка параметров выходного шума происходит при помощи пользовательского интерфейса через сенсорный экран или ethernet-соединение. Данный ГШ применяется в аэрокосмических, спутниковых, медицинских и коммуникационных областях [54].

Цифровые ГШ серий RNG, UFX7000B, DNG7500 и VXI7000 при общем рассмотрении имеют множество схожих параметров, но в каждой серии можно выделить преимущества и недо-

статки. Серия RNG имеет большой выбор устройств и относительно малую погрешность. Серия UFX7000B обладает широким диапазоном частот, большой плотностью шума, но имеет относительно высокую погрешность. Серия DNG7500 обладает более узким диапазоном с малым шагом перестройки частоты. Серия VXI7000 имеет широкий диапазон частот, но относительно высокую погрешность.

Генераторы шума для обеспечения информационной безопасности. ГШ активно применяют в информационной безопасности для различных задач.

Физическую основу сигналов, возникающих во время работы в выделенном помещении радиосредств, составляют побочные электромагнитные излучения и наводки (ПЭМИН). Процессы и явления, образующие ПЭМИН, по способам возникновения можно разделить на 5 видов:

- не предусмотренные функциями радиосредств и электрических приборов;
- преобразования внешних акустических сигналов в электрические сигналы;
- паразитные связи и наводки;
- побочные низкочастотные излучения;
- побочные высокочастотные излучения.

ГШ "Покров" (рис. 15, *а*), разработанный

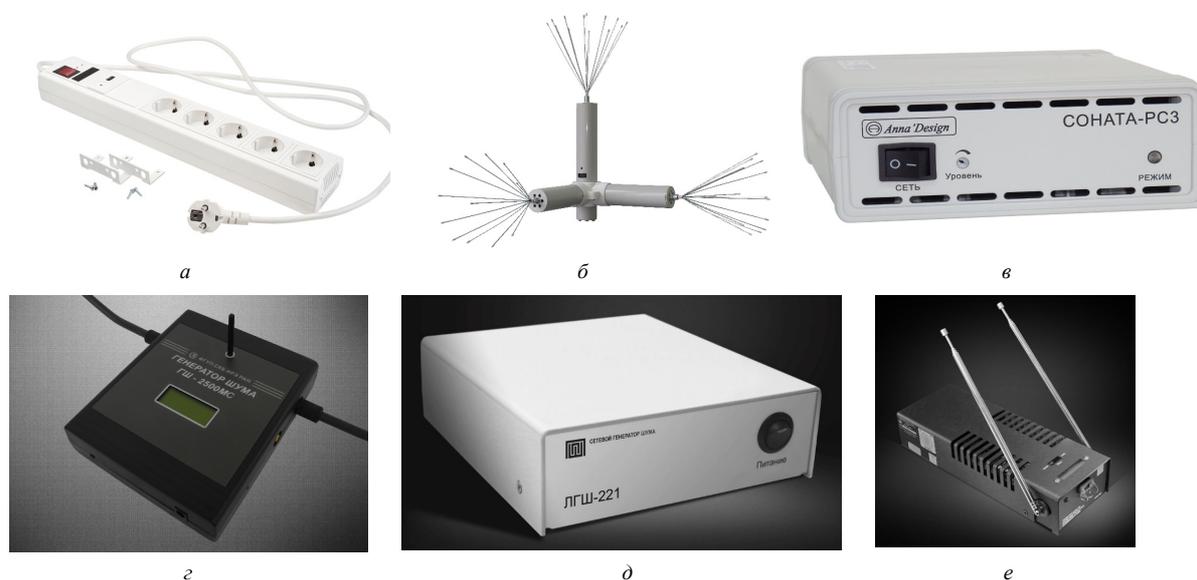


Рис. 15. Генераторы шума для информационной безопасности: *а* – "Покров" фирмы ООО "Радиоэлектронные системы"; *б* – "Соната-Р3" фирмы ООО "Анна"; *в* – "Соната-РС3" фирмы ООО "Анна"; *г* – ГШ-2500МС, разработанный ФГУП СКБ ИРЭ РАН; *д* – ЛГШ-221 фирмы АО "Лаборатория противодействия промышленному шпионажу"; *е* – ЛГШ-503 фирмы АО "Лаборатория противодействия промышленному шпионажу"

Fig. 15. Noise generators for information security: *a* – "Pokrov" company LLC "Radioelectronic systems"; *б* – "Sonata-R3" company LLC "Anna"; *в* – "Sonata-RS3" of the company "Anna"; *г* – GSh-2500MS developed by the Federal State Unitary Enterprise SKB IRE RAS; *д* – LGSh-221 of the JSC "Laboratory for combating industrial espionage"; *е* – LGSh-503 of the Laboratory for Combating Industrial Espionage, JSC

ООО "Радиоэлектронные системы", предназначен для защиты информации от утечки по техническим каналам за счет ПЭМИН посредством излучения в окружающее пространство электромагнитного поля шумового сигнала и наводок на линии электропитания и заземления. ГШ имеет централизованное управление и контроль по Ethernet для применения в системах пространственного зашумления, а также независимую регулировку уровней электромагнитного поля шумового сигнала и шумового сигнала в линии электропитания и заземления. Выполнен в виде сетевого удлинителя с пятью розетками типа F [55].

ГШ "Соната-Р3", производимый компанией ООО "Анна" (рис. 15, б), является средством активной защиты (САЗ) информации от утечки за счет побочных электромагнитных излучений и наводок [56]. "Соната-Р3" конструктивно может быть выполнен как система из трех САЗ "Соната-Р3.1", установленных вдоль трех взаимно-перпендикулярных осей, либо в виде единого блока.

"Соната-РС3", разработанный компанией ООО "Анна" (рис. 15, в), является устройством для защиты линий электропитания, заземления от утечки информации. Он предназначен для защиты объектов вычислительной техники от утечки информации за счет наводок на линии электропитания и заземления [57].

ГШ ГШ-2500МС, созданный ФГУП СКБ ИРЭ РАН (рис. 15, з), является техническим средством активной защиты и предназначен для маскировки информативных побочных электромагнитных излучений и наводок персональных компьютеров, рабочих станций посредством формирования и излучения в окружающее пространство электромагнитного поля шума и наведения маскирующего сигнала в отходящие цепи и инженерные коммуникации в широком диапазоне частот [58].

ГШ ЛГШ-221 (рис. 15, д), разработанный АО "Лаборатория противодействия промышленному шпионажу" и изготавливаемый компанией ООО "Ленспецпроизводство", предназначен для использования в целях защиты информации, содержащей сведения, составляющие государственную тайну, и иной информации с ограниченным доступом, обрабатываемой тех-

ническими средствами и системами, от утечки за счет наводок посредством формирования маскирующих шумоподобных помех [59].

ГШ ЛГШ-503 (рис. 15, е), созданный АО "Лаборатория противодействия промышленному шпионажу" и производимый компанией ООО "Ленспецпроизводство", является средством активной защиты информации от утечки за счет побочных электромагнитных излучений, а также средством активной защиты информации от наводок информативного сигнала на проводники, в том числе на цепи заземления и электропитания, токопроводящие линии и инженерно-технические коммуникации, выходящие за пределы контролируемой зоны [60].

Измерители коэффициента шума. Для измерения шумовых параметров радиоэлектронных устройств промышленность выпускает измерители коэффициента шума (ИКШ). Все они построены по модуляционному методу с компенсацией собственных шумов. Благодаря преобразованию частоты ИКШ работает в широком диапазоне частот. ИКШ выпускаются как в модульном, так и в приборном исполнениях.

ИКШ NoiseCom серии NC346 (рис. 16) предназначены для прецизионного измерения уровня шума [61]. Конструктивно ИКШ серии NC346 представляет собой сборку, состоящую из схемы стабилизации тока, обеспечивающей режим работы ЛПД, генераторной секции, которая включает в себя ЛПД и согласующую цепь, аттенюатора для обеспечения необходимого уровня и равномерности спектра шумового сигнала, а также малого и практически неизменного коэффициента отражения выхода генератора во включенном и выключенном состояниях, заключенную в общий корпус.

NC346 имеют широкополосный охват и чрезвычайно хорошую стабильность темпера-



Рис. 16. Модульный ИКШ серии NC346 фирмы NoiseCom
Fig. 16. Modular noise figure meter NC346 series from NoiseCom

Табл. 11. Технические параметры модульных ИКШ

Tab. 11. Technical parameters of modular noise figure meters

Производитель	Модель	Диапазон частот, ГГц	Коэффициент шума на выходе, дБ
"Микран"	ГШМ2-18В-11	0.01...18	13...16
"Микран"	ГШМ2-20В-13	0.01...20	13...16

туры и напряжения, что соответствует самым высоким лабораторным стандартам, совместимым с измерителями уровня шума. Доступны выходы 6, 15.5 и 22 дБ, что позволяет приборам точно измерять показатели шума до 20, 30 и 36 дБ соответственно. Диапазон рабочих частот от 10 МГц до 40 ГГц.

ИКШ отечественной компании "Микран" серии ГШМ (табл. 11) предназначены для использования в качестве измерителя перепада спектральной плотности шумовой мощности в диапазоне частот от 0.01 до 20 ГГц (рис. 17, б). Источником шумового напряжения в ИКШ является ЛПД, установленный в модуль гибридной интегральной схемы. Питание ЛПД осуществляется через встроенный стабилизатор тока, обеспечивающий стабильность уровня СПМШ независимо от стабильности напряжения питания ГШ [62].

Модульные ИКШ Maury Microwave серии MT76XX (рис. 17, а) обеспечивают калиброванные уровни шума, необходимые для оценки шумовых характеристик приемников, усилителей и других линейных преобразователей [63]. ИКШ данной серии имеют диапазон частот от 0.01 до 26.5 ГГц с коэффициентом шума на выходе 15 дБ. Быстрое включение-выключение,

наряду со стабильным воспроизводимым уровнем шума и низкими требованиями к энергопотреблению, делают серию MT76XX идеальным дополнением к измерителям уровня шума прямого считывания.

ИКШ серии X5M от "Микран" (рис. 17, в) предназначены для измерения коэффициента шума и коэффициента передачи приемно-усилительных устройств (табл. 12). Работа измерителя коэффициента шума серии X5M основана на сравнении шумов исследуемого объекта с шумами известной интенсивности, создаваемыми измерительным ГШ. Процессу измерения предшествует калибровка — процедура определения характеристик приемного тракта ИКШ, необходимая для точного расчета коэффициента усиления и коэффициента шума измеряемого устройства [64]. Управление X5M осуществляется с помощью персонального компьютера с установленным ПО "Graphit X5M", по интерфейсу Ethernet. Многоканальная система синхронизации обеспечивает совместную работу ИКШ с другими приборами. Возможность управления через команды SCPI позволяет интегрировать прибор в автоматизированные контрольно-измерительные комплек-

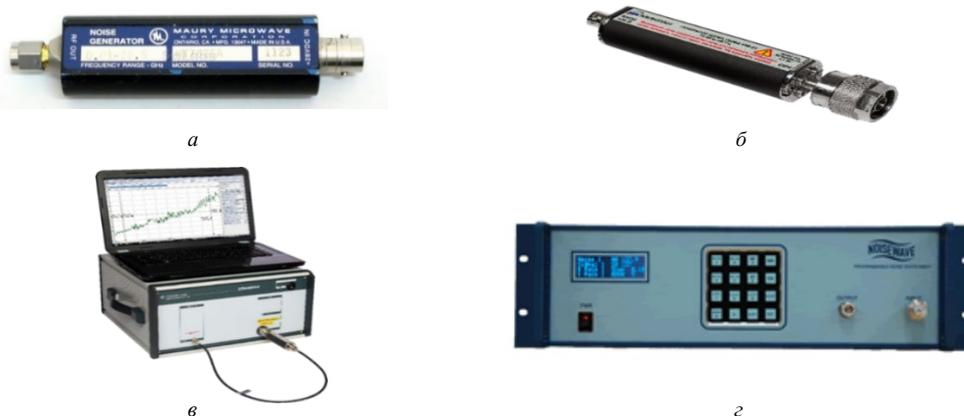


Рис. 17. Измерители коэффициента шума: а – модульный серии MT76XX фирмы Maury Microwave; б – модульный серии ГШМ фирмы "Микран"; в – аппаратный серии X5M фирмы "Микран"; г – аппаратный серии NW-ATE фирмы NoiseWave

Fig. 17. Noise figure meters: а – modular MT76XX series from Maury Microwave; б – modular GShM series from "Mikran"; в – hardware series X5M from "Mikran"; г – hardware series NW-ATE from NoiseWave

Табл. 12. Технические параметры приборного ИКШ "Микран" серии X5M

Tab. 12. Technical parameters of the instrument noise figure meter Mikran X5M series

Технические характеристики	Модели	
	X5M-04	X5M-18
Диапазон рабочих частот	10 МГц...4 ГГц	50 МГц...20 ГГц
Диапазон измерения коэффициента передачи, дБ	-20...30	-20...30
Собственный коэффициент шума, дБ	6	5
Пределы допустимой абсолютной систематической погрешности измерений коэффициента шума, дБ	±0.1	±0.1

Табл. 13. Технические параметры приборных ИКШ

Tab. 13. Technical parameters of instrument noise figure meters

Производитель	Модель	Диапазон частот	Мощность, дБм	Допустимое отклонение, дБ
NoiseWave	NW100M	100 кГц...100 МГц	+13	±1.0
NoiseWave	NW300M	100 кГц...300 МГц	+10	±1.0
NoiseWave	NW500M	100 кГц...500 МГц	+10	±1.5
NoiseWave	NW1G	100 кГц...1 ГГц	+10	±2.0
NoiseWave	NW2G	10 МГц...2 ГГц	0	±2.0
NoiseWave	NW3G	10 МГц...3 ГГц	0	±2.0
NoiseWave	NW4G	10 МГц...4 ГГц	-10	±2.5
NoiseWave	NW6G	10 МГц...6 ГГц	-10	±2.5
NoiseWave	NW18G	2...18 ГГц	-14	±2.5

сы. В зависимости от состава используемых в приборе аппаратных опций анализаторы коэффициента шума разделяются на модификации.

ИКШ Keysight Technologies серии U1831C применяются для широкополосных измерений коэффициента шума. Работают на частотах от 10 МГц до 26.5 ГГц. Показатели ENR варьируются от 12 до 17 дБ, а погрешность составляет в среднем ±0.15 дБ. Можно подключить по USB к ПК [65].

ГШ NoiseWave серии NW-MI – это ИКШ ручного управления (табл. 13), подходящий для многих применений. Области применения этого прибора включают тестирование систем и компонентов беспроводной связи, имитацию сигнала, тестирование телевидения высокой четкости и кабельного телевидения, а также использование в качестве тестового источника общего назначения и экономичного источника для тестирования частоты битовых ошибок [66].

ИКШ NoiseWave серии NW-ATE (рис. 17, з) применяют для тестирования беспроводной связи системы и компонентов, имитации сигнала, тестирования 10-гигабитных сетей Ethernet, HDTV и SATV, а также используют в качестве тестового источника общего назначения (табл. 13) и экономичного источника для тестирования частоты ошибок в битах [67].

Измерители коэффициента шума серий NC346, ГШМ, МТ76ХХ, X5M, NW-MI и NW-

ATE при общем рассмотрении имеют множество отличительных параметров, но в каждой серии можно выделить преимущества и недостатки. Серия NC346 имеет широкий диапазон частот, большой выбор устройств, максимальную рабочую частоту 55 ГГц, но обладает относительно высокой погрешностью. Серия ГШМ имеет небольшой диапазон частот с малым шагом перестройки частоты, но относительно высокую погрешность. Серия МТ76ХХ имеет широкий диапазон частот с небольшим шагом перестройки частоты и с относительно малой погрешностью. Серия X5M имеет небольшой диапазон частот с малым шагом перестройки частоты и малую погрешность, но большие габариты и массу. Серия NW-MI имеет узкий диапазон частот с малым шагом перестройки частоты и с относительно небольшой погрешностью. Серия NW-ATE обладает большим диапазоном частот, но относительно высокой погрешностью.

Заключение. В настоящее время существует большое разнообразие в реализации генераторов шумовых сигналов. Несмотря на большой спектр применений генераторов шумовых сигналов, обзорных публикаций, описывающих их характеристики, крайне мало. На сегодняшний день ГШ для исследовательских целей производит множество компаний, в основ-

ном зарубежных. Наибольшее количество решений представлено компаниями NoiseCom и NoiseWave. Другие иностранные компании, например Maury Microwave, dBm и др., имеют более скромный список выпускаемой продукции. На отечественном рынке компании АО «НПФ "МИКРАН"» и ООО "СКАРД" представляют существенно меньший выбор ГШ по сравнению с зарубежными компаниями. При этом во многих

отечественных компаниях ведутся разработки аналогов зарубежных генераторов шумовых сигналов, а также новых моделей ГШ и измерителей коэффициента шума. В сфере информационной безопасности на рынке отечественных производителей представлен большой выбор компаний, таких, как ООО "Радиоэлектронные системы", ООО "Анна" и т. д.

Авторский вклад

Винокуров Сергей Андреевич – подготовка текста статьи и рисунков.

Кочемасов Виктор Неофидович – подготовка текста статьи.

Сафин Ансар Ризаевич – подготовка текста статьи.

Author's contribution

Sergey A. Vinokurov, preparation of the text and figures for the paper.

Victor N. Kochemasov, preparation of the text for the paper.

Ansar R. Safin, preparation of the text for the paper.

Список литературы

1. Тетерич Н. М. Генераторы шума. М.: Госэнергоиздат, 1961. 128 с.
2. Бендат Дж. Основы теории случайных шумов и ее применения. М.: Наука, 1965. 464 с.
3. Мун Ф. Хаотические колебания: вводный курс для научных работников и инженеров. М.: Мир, 1990. 312 с.
4. Черепанов В. П., Коневских В. М., Львов В. Н. Газоразрядные источники шумов. М.: Сов. радио, 1968. 54 с.
5. Фабер О. Генераторы шума на стабилитронах. М.: Радио, 1969. 101 с.
6. ФЭУ-22. URL: <https://zapadpribor.com/feu-22/> (дата обращения 26.09.2022)
7. Урбанович П. В. Генератор шума с подстройкой диапазонов // Докл. ТУСУРа. 2008. № 2 (18). Ч. 1. С. 9–11.
8. Мясин Е. А., Котов В. Д. Широкополосные диодные генераторы шума миллиметрового диапазона волн // Радиотехника. 2005. № 3. С. 46–50.
9. Design and implementation of an X-band white Gaussian noise generator / R. A. Gholam, M. Norooz, K. Masoud, M. S. Hamid Mir // Proc. of 2008 Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering. Niagara Falls, ON, Canada, 04–07 May 2008. P. 4.
10. Перов Б. Г. Анализ математических моделей каналов связи с белым гауссовым шумом // Молодой ученый. 2013. № 6 (53). С. 114–116.
11. Аудиовыход как скрытый канал утечки данных: технологии создания и методы защиты / М. М. Фучко, А. В. Широких, А. А. Захаров, Е. С. Несговоров, Е. А. Оленников // Вестн. УрФО. Безопасность в информационной сфере. 2016. № 3 (21). С. 4–9.
12. NC100/200/300/400 datasheet. URL: <https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/nc100200300400web.pdf> (дата обращения 14.09.2023)
13. NW100/200/300/400 datasheet. URL: <https://noisewave.com/diodes> (дата обращения 15.11.2022)
14. NC500/500SM datasheet. URL: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC500REV3_datasheet_WEB.pdf (дата обращения 15.11.2022)
15. NC2000/4000 datasheet. URL: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC2_4000_Datasheet_WEB.pdf (дата обращения 15.11.2022)
16. NW-D datasheet. URL: <https://noisewave.com/nw-d.html> (дата обращения 15.11.2022)
17. NC3400 datasheet. URL: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC3400_Datasheet_719.pdf (дата обращения 17.11.2022)
18. NX1500 datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/atm-inc/608-249-nx1501r/> (дата обращения 19.11.2022)
19. CI600/700/800/900 datasheet. URL: <https://www.chipfind.ru/datasheet/mwireless/ci600n.htm> (дата обращения 23.11.2022)
20. 1660X datasheet. URL: <https://arrivatek.com/wp-content/uploads/2022/08/Specifikaciya-Seriya-1660H.pdf> (дата обращения 14.09.2023)
21. NW-CS datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/noisewave/608-177-nw2g-15-cs/> (дата обращения 25.11.2022)
22. R&S@FS-SNS datasheet. URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/product_brochure/5216_2718_11/FS-SNS_bro_de_5216_2718_11_v0400.pdf (дата обращения 09.06.2023)

23. 346X datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/agilent-technologies/608-23-364c> (дата обращения 09.06.2023)
24. STZ-08-01 datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/sage-millimeter-inc/608-278-stz-08-01> (дата обращения 09.06.2023)
25. NMA-2400 datasheet. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/296895/MICRONETICS/NMA-2410.html> (дата обращения 25.11.2022)
26. NC5000A datasheet. URL: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC5000A_Datasheet.pdf (дата обращения 17.11.2022)
27. B3NG16 datasheet. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694679056&tld=ru&lang=en&name=E2v.pdf&text=series%20B3NG16%20from%20Teledyne%20e2v&url=http%3A%2F%2Fwww.advante.ru%2Fcomponents%2FE2v.pdf&lr=213&mime=pdf&110n=ru&sign=28e25e8e436a93a9dde8d6875f3ac1e0&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694679056%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DE2v.pdf%26text%3Dseries%2BB3NG16%2Bfrom%2BTeledyne%2Be2v%26url%3Dhttp%253A%2F%2Fwww.advante.ru%2Fcomponents%2FE2v.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26110n%3Dru%26sign%3D28e25e8e436a93a9dde8d6875f3ac1e0%26keyno%3D0%26nosw%3D1> (дата обращения 14.09.2023)
28. MH datasheet. URL: <http://skard.ru/product/seriya-mh/> (дата обращения 23.11.2022)
29. WG-NS datasheet. URL: <http://farran.ru/pdf/Farran%20Catalogue%208th%20Edition%202009.pdf> (дата обращения 25.11.2022)
30. Q347B datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/agilent-technologies/608-23-q347b> (дата обращения 10.06.2023)
31. STZ-19-I1 datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/sage-millimeter-inc/608-278-stz-19-i1> (дата обращения 10.06.2023)
32. STZ-22-I1 datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/sage-millimeter-inc/608-278-stz-22-i1> (дата обращения 10.06.2023)
33. NC1000 datasheet. URL: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC1000_Datasheet.pdf (дата обращения 17.11.2022)
34. PNS-XX datasheet. URL: <https://elva-1.com/products/a40037/> (дата обращения 23.11.2022)
35. NC3000 datasheet. URL: <https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/nc3000-coaxial-noise-sources-datasheet.pdf> (дата обращения 17.11.2022)
36. ISSN-XX datasheet. URL: <https://elva-1.com/products/a40036/> (дата обращения 23.11.2022)
37. NW-CS-I datasheet. URL: https://noisewave.com/spec_sheets/NW-cs-i_revA.pdf (дата обращения 25.11.2022)
38. PNG7000A datasheet. URL: https://testequipment.center/Product_Documents/Noise-com-PNG7107-Specifications-45DCC.pdf (дата обращения 26.11.2022)
39. CNG-EbNo datasheet. URL: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/cng-ebno_datasheet.pdf?ver=2022-03-29-172303-327 (дата обращения 26.11.2022)
40. JV9000 datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-generators/NoiseCom/864-300-jv9000-series/> (дата обращения 26.11.2022)
41. J7000A datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-generators/noisecom/864-300-j7000a-series> (дата обращения 14.09.2023)
42. UFX7000A datasheet. URL: <https://noisecom.com/products/instruments/ufx7000a-awgn-noise-generator> (дата обращения 26.11.2022)
43. MODEL 2007 Noise Source datasheet. URL: <https://www.crosstechnologies.com/manuals/2007%20MANUAL.pdf> (дата обращения 26.11.2022)
44. TAS 420 datasheet. URL: <https://www.microwavejournal.com/articles/2488-test-equipment/> (дата обращения 27.11.2022)
45. CNG datasheet. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694679621&tld=ru&lang=en&name=CNG11.pdf&text=Noise%20Generator%20-%20CNG%20Series&url=https%3A%2F%2Fwww.dmgcommunication.it%2Fwp-content%2Fuploads%2F2016%2F02%2FCNG11.pdf&lr=213&mime=pdf&110n=ru&sign=167025bb8864c68fe414150223fd995d&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694679621%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DCNG11.pdf%26text%3DNoise%2BGenerator%2B%25E2%2580%2593%2BCNG%2BSeries%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.dmgcommunication.it%2Fwp-content%2Fuploads%2F2016%2F02%2FCNG11.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26110n%3Dru%26sign%3D167025bb8864c68fe414150223fd995d%26keyno%3D0%26nosw%3D1> (дата обращения 14.09.2023)
46. АКПП-3501. URL: https://prist.ru/upload/iblock/c6f/t1tmc08mye0zzthwi3hek73phokut1b1/SU4300_4301_4302-_AKIP_3501_1_2_3-_katalog.pdf (дата обращения 11.06.2023)
47. NC6000/8000A datasheet. URL: <https://noisecom.com/products/instruments/nc6000a-8000a-series-awgn-noise-generator/product-information> (дата обращения 26.11.2022)
48. PE85N1018 datasheet. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/806842/PASTERNAK/PE85N1018.html> (дата обращения 26.11.2022)
49. ANG datasheet. URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694680105&tld=ru&lang=en&name=ANG%20Series%20V1.0_2.pdf&text=Atlantic%20Microwave%20ANG%20datasheet&url=https%3A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FANG%2520Series%2520V1.0_2.pdf&lr=213&mime=pdf&110n=ru&si

gn=6d9ec723eef1db34b553981b2b772202&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694680105%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DANG%2520Series%2520V1.0_2.pdf%26text%3DAtlantic%2BMicrowave%2BANG%2Bdatasheet%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FRNG%2520Series%2520V1.0_2.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26110n%3Dru%26sign%3D6d9ec723eef1db34b553981b2b772202%26keyno%3D0%26nosw%3D1 (дата обращения 14.09.2023)

50. RNG datasheet. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694680241&tld=ru&lang=en&name=RNG%20Series%20V1.0.pdf&text=Atlantic%20Microwave%20RNG%20datasheet&url=https%3A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FRNG%2520Series%2520V1.0.pdf&lr=213&mime=pdf&110n=ru&sign=c8acc7769279a06d476b348788bb11&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694680241%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DRNG%2520Series%2520V1.0.pdf%26text%3DAtlantic%2BMicrowave%2BRNG%2Bdatasheet%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FRNG%2520Series%2520V1.0.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26110n%3Dru%26sign%3Dca8acc7769279a06d476b348788bb11%26keyno%3D0%26nosw%3D1> (дата обращения 14.09.2023)

51. UFX7000B datasheet. URL: <https://noisecom.com/products/instruments/ufx7000b-programmable-noise-generator> (дата обращения 27.11.2022)

52. DNG7500 datasheet. URL: https://www.4test.ru/catalog/radioizmeritelnoe_oborudovanie/istochniki_shuma_1/istochniki_shuma_dng7500/ (дата обращения 27.11.2022)

53. VXI7000 datasheet. URL: <https://www.rfglobalnet.com/doc/NoiseCom-vxi7000-series-vxibus-programmable-n-0002/> (дата обращения 27.11.2022)

54. NGX1000 datasheet. URL: <https://boonton.com/Portals/0/datasheets/boonton-ngx1000-programmable-noise-generator-datasheet.pdf> (дата обращения 11.06.2023)

55. Генератор шума Покров. URL: <https://irsural.ru/poleznaaya-informaciya/generator-shuma-pokrov/> (дата обращения 25.02.23)

56. Соната-Р3. URL: <https://irsural.ru/szi/pemin/saz/sonata-r31-product-9.html> (дата обращения 25.02.23)

57. Соната-РС3. URL: <https://irsural.ru/szi/pemin/saz/sonata-rs3-sredstvo-aktivnoi-zashity-informacii-ot-utechki-po-seti-elektropitaniya-i-liniyam-zazemleniya-1-klass-product-20.html> (дата обращения 25.02.23)

58. Генератор шума ГШ-2500МС. URL: <https://irsural.ru/szi/pemin/saz/gsh-2500ms-generator-shuma-isp-tidn464217010-product-377.html> (дата обращения 25.02.23)

59. Генератор шума ЛГШ-221. URL: <http://www.pps.ru/?part=catalog&product=243/> (дата обращения 25.02.23)

60. Генератор шума ЛГШ-503. URL: <http://www.pps.ru/?part=catalog&product=93/> (дата обращения 25.02.23)

61. NC346 datasheet. URL: <https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/nc346-datasheet.pdf> (дата обращения 14.09.2023)

62. ГШМ datasheet. URL: <https://www.micran.ru/productions/IIS/kia/gshm/gshm/> (дата обращения 23.11.2022)

63. МТ7600 datasheet. URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694680428&tld=ru&name=Mauray_MT76xx.pdf&text=Mauray%20Microwave%20MT7600&url=http%3A%2F%2Fwww.sglabs.it%2Fpublic%2FMauray_MT76xx.pdf&lr=213&mime=pdf&110n=ru&sign=bf9ff9a63dd3a7d605739fa7911d70ac&keyno=0&serpParams=tm%3D1694680428%26tld%3Dru%26name%3DMauray_MT76xx.pdf%26text%3D%25D0%259Cauray%2BMicrowave%2BMT7600%26url%3Dhttp%253A%2F%2Fwww.sglabs.it%2Fpublic%2FMauray_MT76xx.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26110n%3Dru%26sign%3Dbf9ff9a63dd3a7d605739fa7911d70ac%26keyno%3D0 (дата обращения 14.09.2023)

64. X5M datasheet. URL: <https://www.micran.ru/productions/IIS/kia/nfa/x5m/> (дата обращения 27.11.2022)

65. U1831C datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/agilent-technologies/608-23-u1831c> (дата обращения 12.06.2023)

66. NW-MI datasheet. URL: <https://noisewave.com/nw-mi.html> (дата обращения 27.11.2022)

67. NW-ATE datasheet. URL: <https://noisewave.com/nw-ate.html/> (дата обращения 27.11.2022)

Информация об авторах

Винокуров Сергей Андреевич – аспирант кафедры формирования и обработки радиосигналов Национального исследовательского университета (НИУ) "МЭИ", инженер-разработчик ООО "Радиокомп", инженер ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – радиофизика и электроника; устройства формирования и обработки радиосигналов.

Адрес: НИУ "МЭИ", ул. Красноказарменная, д. 14, Москва, 111250, Россия

E-mail: sergey.vinokurov@yandex.ru

Кочемасов Виктор Неофидович – кандидат технических наук (1976), генеральный директор ООО "Радиокомп". Автор более 150 научных работ, включая 4 монографии и более 40 авторских свидетельств на изобретения. Сфера научных интересов – радиотехника; устройства формирования и обработки радиосигналов,

фильтры СВЧ; синтезаторы частот и сигналов.

Адрес: ООО "Радиокомп", пр. Волгоградский, д. 42, Москва, 109316, Россия

E-mail: kochemasovdv@gmail.com

Сафин Ансар Ризаевич – кандидат технических наук (2014), доцент, заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов НИУ "МЭИ", старший научный сотрудник ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, начальник отдела в ООО "Радиокомп". Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – радиофизика и электроника; физика магнитных явлений; спинтроника.

Адрес: НИУ "МЭИ", ул. Красноказарменная, д. 14, Москва, 111250, Россия

E-mail: arsafin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>

References

1. Teterich N. M. *Generatory shuma* [Noise generators]. Moscow, Gosenergoizdat, 1961, 128 p. (In Russ.)
2. Bendat J. *Osnovy teorii sluchainykh shumov i ee primeneniya* [Fundamentals of the Theory of Random Noise and Its Application]. Moscow, Nauka, 1965, 464 p. (In Russ.)
3. Moon F. *Khaoticheskie kolebaniya: vvodnyi kurs dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Chaotic Fluctuations: an Introductory Course for Scientists and Engineers]. Moscow, Mir, 1990, 312 p. (In Russ.)
4. Cherepanov V. P., Konevskikh V. M., Lvov V. N. *Gazorazryadnye istochniki shumov* [Gas-Discharge Noise Sources]. Moscow, Soviet Radio, 1968, 54 p. (In Russ.)
5. Faber O. *Generatory shuma na stabilitonakh* [Noise Generators on Zener Diodes]. Moscow, Radio, 1969, 101 p. (In Russ.)
6. FEU-22. Available at: <https://zapadpribor.com/feu-22/> (accessed 26.09.2022).
7. Urbanovich P. V. Noise Generator with Range Adjustment. Reports of TUSUR. 2008, no. 2 (18), pt. 1, pp. 9–11. (In Russ.)
8. Myasin E. A., Kotov V. D. Broadband Diode Noise Generators of the Millimeter Wave Range. Radio Engineering. 2005, no. 3, pp. 46–50. (In Russ.)
9. Gholam R. A., Norooz M., Masoud K., Hamid Mir M. S. Design and Implementation of an X-band white Gaussian Noise Generator. Proc. of 2008 Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering. Niagara Falls, ON, Canada, 04–07 May 2008, p. 4.
10. Perov B. G. Analysis of Mathematical Models of Communication Channels with White Gaussian noise. Young Scientist. 2013, no. 6 (53), pp. 114–116. (In Russ.)
11. Fuchko M. M., Shirokikh A. V., Zakharov A. A., Nesgovorov E. S., Olennikov E. A. Audio Output as a Hidden Data Leakage Channel: Creation Technologies and Protection Methods. Vestn. UrFO. Security in the Information Sphere. 2016, no. 3 (21), pp. 4–9. (In Russ.)
12. NC100/200/300/400 datasheet. Available at: <https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/nc100200300400web.pdf> (accessed 14.09.2023)
13. NW100/200/300/400 datasheet. Available at: <https://noisewave.com/diodes> (accessed 15.11.2022)
14. NC500/500SM datasheet. Available at: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC500REV3_datasheet_WEB.pdf (accessed 15.11.2022)
15. NC2000/4000 datasheet. Available at: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC2_4000_Datasheet_WEB.pdf (accessed 15.11.2022)
16. NW-D datasheet. Available at: <https://noisewave.com/nw-d.html> (accessed 15.11.2022)
17. NC3400 datasheet. Available at: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC3400_Datasheet_719.pdf (accessed 17.11.2022)
18. NX1500 datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/atm-inc/608-249-nx1501r/> (accessed 19.11.2022)
19. CI600/700/800/900 datasheet. Available at: <https://www.chipfind.ru/datasheet/mwireless/ci600n.htm/> (accessed 23.11.2022)
20. 1660X datasheet. Available at: <https://arrivatek.com/wp-content/uploads/2022/08/Specifikaciya-Seriya-1660H.pdf> (accessed 14.09.2023)
21. NW-CS datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/noisewave/608-177-nw2g-15-cs/> (accessed 25.11.2022)
22. R&S@FS-SNS datasheet. Available at: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/product_brochure/5216_2718_11/FS-SNS_bro_de_5216_2718_11_v0400.pdf (accessed 09.06.2023)
23. 346X datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/agilent-technologies/608-23-364c> (accessed 09.06.2023)
24. STZ-08-01 datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/sage-millimeter-inc/608-278-stz-08-01> (accessed 09.06.2023)
25. NMA-2400 datasheet. Available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/296895/MICRONETICS/NMA-2410.html/> (accessed 25.11.2022)
26. NC5000A datasheet. Available at: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC5000A_Datasheet.pdf (accessed 17.11.2022)
27. B3NG16 datasheet. Available at: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694679056&tld=ru&lang=en&name=E2v.pdf&text=series%20B3NG16%20from%20Teledyne%20e2v&url=http%3A%2F%2Fwww.advante.ru%2Fcomponents%2FE2v.pdf&lr=213&mime=pdf&110n=ru&sign=28e25e8e436a93a9dde8d6875f3ac1e0&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694679056%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DE2v.pdf%26text%3Dseries%2BB3NG16%2Bfrom%2BTeledyne%2Be2v%26url%3Dhttp%253A%2F%2Fwww.adv>

ante.ru%2Fcomponents%2FE2v.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26l10n%3Dru%26sign%3D28e25e8e436a93a9dde8d6875f3ac1e0%26keyno%3D0%26nosw%3D1 (accessed 14.09.2023)

28. MH datasheet. Available at: <http://skard.ru/product/seriya-mm/> (accessed 23.11.2022)

29. WG-NS datasheet. Available at: <http://farran.ru/pdf/Farran%20Catalogue%20th%20Edition%202009.pdf> (accessed 25.11.2022)

30. Q347B datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/agilent-technologies/608-23-q347b> (accessed 10.06.2023)

31. STZ-19-I1 datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/sage-millimeter-inc/608-278-stz-19-i1> (accessed 10.06.2023)

32. STZ-22-I1 datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/sage-millimeter-inc/608-278-stz-22-i1> (accessed 10.06.2023)

33. NC1000 datasheet. Available at: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC1000_Datasheet.pdf (accessed 17.11.2022)

34. PNS-XX datasheet. Available at: <https://elva-1.com/products/a40037/> (accessed 23.11.2022)

35. NC3000 datasheet. Available at: <https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/nc3000-coaxial-noise-sources-datasheet.pdf> (accessed 17.11.2022)

36. ISSN-XX datasheet. Available at: <https://elva-1.com/products/a40036/> (accessed 23.11.2022)

37. NW-CS-I datasheet. Available at: https://noisewave.com/spec_sheets/NW-cs-i_revA.pdf (accessed 25.11.2022).

38. PNG7000A datasheet. Available at: https://testequipment.center/Product_Documents/Noisecom-PNG7107-Specifications-45DCC.pdf (accessed 26.11.2022)

39. CNG-EbNo datasheet. Available at: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/cng-ebno_datasheet.pdf?ver=2022-03-29-172303-327 (accessed 26.11.2022)

40. JV9000 datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-generators/NoiseCom/864-300-jv9000-series/> (accessed 26.11.2022)

41. J7000A datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-generators/noisecom/864-300-j7000a-series> (accessed 14.09.2023)

42. UFX7000A datasheet. Available at: <https://noisecom.com/products/instruments/ufx7000a-awgn-noise-generator> (accessed 26.11.2022)

43. MODEL 2007 Noise Source datasheet. Available at: <https://www.crosstechnologies.com/manuals/2007%20MANUAL.pdf> (accessed 26.11.2022)

44. TAS 420 datasheet. Available at: <https://www.microwavejournal.com/articles/2488-test-equipment/> (accessed 27.11.2022)

45. CNG datasheet. Available at: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694679621&tld=ru&lang=en&name=CNG11.pdf&text=Noise%20Generator%20-%20CNG%20Series&url=https%3A%2F%2Fwww.dmgcommunication.it%2Fwp-con-tent%2Fuploads%2>

F2016%2F02%2FCNG11.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=167025bb8864c68fe414150223fd995d&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694679621%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DCNG11.pdf%26ext%3DNoise%2BGenerator%2B%25E2%2580%2593%2BCNG%2BSeries%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.dmgcommunication.it%2Fwp-con-tent%2Fuploads%2F2016%2F02%2FCNG11.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26l10n%3Dru%26sign%3D167025bb8864c68fe414150223fd995d%26keyno%3D0%26nosw%3D1 (accessed 14.09.2023)

46. АКПП-3501. Available at: https://prist.ru/upload/iblock/c6f/t1tmc08mye0zzthwi3hek73phokut1b1/SU4300_4301_4302-_AKIP_3501_1_2_3-_katalog.pdf (accessed 11.06.2023)

47. NC6000/8000A datasheet. Available at: <https://noisecom.com/products/instruments/nc6000a-8000a-series-awgn-noise-generator/product-information> (accessed 26.11.2022)

48. PE85N1018 datasheet. Available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/806842/PASTERNAK/PE85N1018.html/> (accessed 26.11.2022)

49. ANG datasheet. Available at: [50. RNG datasheet. Available at: \[51. UFX7000B datasheet. Available at: <https://noisecom.com/products/instruments/ufx7000b->\]\(https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694680241&tld=ru&lang=en&name=RNG%20Series%20V1.0.pdf&text=Atlantic%20Microwave%20RNG%20datasheet&url=https%3A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FRNG%2520Series%2520V1.0.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=ca8cacc7769279a06d476b348788bb11&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694680241%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DRNG%2520Series%2520V1.0.pdf%26text%3DAtlantic%2BMicrowave%2BRNG%2Bdatasheet%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FRNG%2520Series%2520V1.0.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26l10n%3Dru%26sign%3Dca8cacc7769279a06d476b348788bb11%26keyno%3D0%26nosw%3D1 \(accessed 14.09.2023\)</p></div><div data-bbox=\)](https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694680105&tld=ru&lang=en&name=ANG%20Series%20V1.0_2.pdf&text=Atlantic%20Microwave%20ANG%20datasheet&url=https%3A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FANG%2520Series%2520V1.0_2.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=6d9ec723eef1db34b553981b2b772202%26keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694680105%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DANG%2520Series%2520V1.0_2.pdf%26text%3DAtlantic%2BMicrowave%2BANG%2Bdatasheet%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FANG%2520Series%2520V1.0_2.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26l10n%3Dru%26sign%3D6d9ec723eef1db34b553981b2b772202%26keyno%3D0%26nosw%3D1 (accessed 14.09.2023)</p></div><div data-bbox=)

programmable-noise-generator (accessed 27.11.2022)

52. DNG7500 datasheet. Available at: https://www.4test.ru/catalog/radioizmeritelnoe_oborudovanie/istochniki_shuma_1/istochniki_shuma_dng7500/ (accessed 27.11.2022)

53. VXI7000 datasheet. Available at: <https://www.rfglobalnet.com/doc/NoiseCom-vxi7000-series-vxibus-programmable-n-0002/> (accessed 27.11.2022)

54. NGX1000 datasheet. Available at: <https://boonton.com/Portals/0/datasheets/boonton-ngx1000-programmable-noise-generator-datasheet.pdf> (accessed 11.06.2023)

55. Generator шума Pokrov. Available at: <https://irsural.ru/poleznaya-informaciya/generator-shumapokrov/> (accessed 25.02.23)

56. Sonata-R3. Available at: <https://irsural.ru/szi/pemin/saz/sonata-r31-product-9.html> (accessed 25.02.23)

57. Sonata-RS3. Available at: <https://irsural.ru/szi/pemin/saz/sonata-rs3-sredstvo-aktivnoi-zashity-informacii-ot-utechki-po-seti-elektropitaniya-i-liniyam-zazemleniya-1-klass-product-20.html> (accessed 25.02.23)

58. Noise generator GSh-2500MS. Available at: <https://irsural.ru/szi/pemin/saz/gsh-2500ms-generator-shuma-isp-tidn464217010-product-377.html> (accessed 25.02.23)

59. Noise generator LGSh-221. Available at: <http://www.pps.ru/?part=catalog&product=243/> (accessed 25.02.23)

60. Noise generator LGSh-503. Available at: <http://www.pps.ru/?part=catalog&product=93/> (accessed 25.02.23)

61. NC346 datasheet. Available at: <https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/nc346-datasheet.pdf> (accessed 17.11.2022)

62. ПИИМ datasheet. Available at: <https://www.micran.ru/productions/IIS/kia/gshm/gshm/> (accessed 23.11.2022)

63. MT7600 datasheet. Available at: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694680428&tld=ru&name=Maury_MT76xx.pdf&text=Maury%20Microwave%20MT7600&url=http%3A%2F%2Fwww.sglabs.it%2Fpublic%2FMaury_MT76xx.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=bf9ff9a63dd3a7d605739fa7911d70ac&keyno=0&serpParams=tm%3D1694680428%26tld%3Dru%26name%3DMAury_MT76xx.pdf%26text%3D%25D0%259Caury%2BMicrowave%2BMT7600%26url%3Dhttp%253A%2F%2Fwww.sglabs.it%2Fpublic%2FMaury_MT76xx.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26l10n%3Dru%26sign%3Dbf9ff9a63dd3a7d605739fa7911d70ac%26keyno%3D0 (accessed 14.09.2023)

64. X5M datasheet. Available at: <https://www.micran.ru/productions/IIS/kia/nfa/x5m/> (accessed 27.11.2022)

65. U1831C datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/agilent-technologies/608-23-u1831c> (accessed 12.06.2023)

66. NW-MI datasheet. Available at: <https://noisewave.com/nw-mi.html/> (accessed 27.11.2022)

67. NW-ATE datasheet. Available at: <https://noisewave.com/nw-ate.html/> (accessed 27.11.2022)

Information about the authors

Sergey A. Vinokurov, Postgraduate of the Department of Formation and Processing of Radio Signal of NRU "MPEI", Engineer-developer of Radiocomp LLC, Engineer at the Institute of Radio Technologies and Electronics of the Russian Academy of Science n. a. V. A. Kotelnikov. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: radiophysics and electronics; devices for the formation and processing of radio signals.

Address: NRU "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

E-mail: sergey.vinokurov@yandex.ru

Victor N. Kochemasov, Cand. Sci. (Eng.) (1976), General Director of Radiocomp LLC. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: radio engineering; devices for the generation and processing of radio signals; microwave filters; synthesizers of frequencies and signals.

Address: Radiocomp LLC, 42, Volgogradsky Ave., Moscow 109316, Russia

E-mail: kochemasovdv@gmail.com

Ansar R. Safin, Cand. Sci. (Eng.) (2014), Head of the Department of Radio Signal Generation and Processing, NRU "MPEI", Senior Researcher at the Institute of Radio Technologies and Electronics of the Russian Academy of Science n. a. V. A. Kotelnikov, Head of the Department of Radiocomp LLC. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: radiophysics and electronics; physics of magnetic phenomena; spintronics.

Address: NRU "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

E-mail: arsafin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>

Конструктивные подходы к интеграции приборов на основе разных полупроводниковых технологий в микроэлектронике СВЧ

А. С. Ефимов ✉

АО «НПП "Исток" им. Шокина», Фрязино, Россия

✉ eamov@gmail.com

Аннотация

Введение. Достижение высоких характеристик радиоэлектронной системы требует применения комбинации приборов, реализованных на разных полупроводниковых технологиях, – гетерогенной интеграции. Достоинства гетерогенной интеграции очевидны при компактном соединении элементов в единую схему. Развитие подходов интеграции, обеспечивающих повышенную функциональность и улучшенные рабочие характеристики, является актуальной проблемой современной электронной компонентной базы СВЧ.

Цель работы. Аналитический обзор современных и перспективных направлений конструктивных решений интеграции микроэлектроники СВЧ на основе разных широкозонных полупроводниковых технологий.

Материалы и методы. Рассмотрены 8 подходов интеграции, обеспечивающих соединение приборов на разных полупроводниковых технологиях в СВЧ-диапазоне: монолитная гетерогенная интеграция, монтаж пластина-к-пластине, метод переноса слоев, интеграция в единую подложку, интеграция методом печати, интеграция проволоками, перевернутый монтаж, hot-via. Рассмотрены конструктивные подходы интеграции, этапы реализации, достоинства и недостатки.

Результаты. Монолитная гетерогенная интеграция и монтаж пластина-к-пластине, как и метод переноса слоев, несмотря на минимальные длины межсоединений, имеют ряд фундаментальных ограничений, связанных с совместимостью разных полупроводниковых материалов, а также требуют больших технологических возможностей, что сдерживает их развитие и применение. Интеграция в единую подложку из-за вариативности реализации позволяет обеспечить уникальные характеристики, например благодаря интеграции магнитных материалов, однако требует высокой сложности технологических процессов интеграции. Метод перевернутого монтажа обеспечивает минимальные потери и паразитные составляющие переходных межсоединений в СВЧ-диапазоне благодаря миниатюризации переходных межсоединений. Hot-via, как модификация метода перевернутого монтажа, обеспечивает лучшую совместимость с микрополосковыми схемами. Их дальнейшее совершенствование и массовое применение во многом зависят от развития технологии формирования локальных переходных межсоединений.

Заключение. Развитие подходов близкой интеграции в микроэлектронике СВЧ идет как в монолитном направлении – монолитная гетерогенная интеграция и монтаж пластина-к-пластине, так и в гибридно-монолитном – метод переноса слоев, интеграция в единую подложку, применение аддитивных технологий, перевернутый монтаж и hot-via. Проведенный сравнительный анализ представленных методов имеет практическое применение.

Ключевые слова: СВЧ, гибридно-монолитная интегральная схема, широкозонные полупроводники, гетерогенная интеграция

Для цитирования: Ефимов А. С. Конструктивные подходы к интеграции приборов на основе разных полупроводниковых технологий в микроэлектронике СВЧ // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 33–55. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-33-55

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.06.2023; принята к публикации после рецензирования 10.07.2023; опубликована онлайн 28.09.2023



Approaches to Heterogeneous Integration for Millimeter-Wave Applications

Alexander S. Efimov 

JSC RPC "Istok" n. a. Shokin", Fryazino, Russia

easmov@gmail.com

Abstract

Introduction. Enhanced performance of electronic systems can be achieved by heterogeneous integration of different semiconductor technologies. The benefits of heterogeneous integration become obvious when close connections between the devices are provided. The development of integration approaches, enabling functionality and improved performance, appears a relevant task for modern microwave microelectronics.

Aim. Review of state-of-the-art and promising heterogeneous integration concepts and techniques in microwave microelectronics.

Materials and methods. Eight integration approaches that ensure the connection of devices based on different semiconductor technologies for microwave frequencies are considered: monolithic heterogeneous integration, wafer bonding, micro-transfer printing, embedded chip assembly, print additive manufacturing, wire bonding, flip-chip, and hot-via. The integration approaches are analyzed in terms of their implementation specifics, advantages and disadvantages.

Results. Monolithic heterogeneous integration and wafer bonding, as well as micro-transfer printing, despite the minimum interconnections, have a number of fundamental limitations. These limitations are related to the compatibility of various semiconductor technologies and the necessity of high technological capabilities. The technology of embedded chip assembly enables the variability of implementation techniques, which makes it possible to provide unique characteristics, e.g., due to the integration of magnetic materials. However, this approach is associated with a high complexity of integration technological processes. Flip-chip integration ensures minimal interconnect losses due to bump miniaturization. Hot-via, as a modification of flip-chip, provides for a better compatibility with microstrip type circuitry. Their further improvement and mass application largely depends on the development of technologies for the formation of low-pitch interconnections.

Conclusion. The development of close integration approaches in microwave microelectronics is proceeding both in the monolithic direction, i.e., monolithic heterogeneous integration wafer bonding, as well as in the quasi-monolithic direction, i.e., micro-transfer printing, embedded chip assembly, print additive manufacturing, flip-chip, and hot-via. The conducted comparative analysis of the presented methods has practical application.

Keywords: millimeter-wave, quasi-monolithic microwave integrated circuit, wide band gap semiconductors, heterogeneous integration

For citation: Efimov A. S. Approaches to Heterogeneous Integration for Millimeter-Wave Applications. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 33–55. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-33-55

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 09.06.2023; accepted 10.07.2023; published online 28.09.2023

Введение. Электронная компонентная база (ЭКБ) СВЧ развивается в части повышения уровней мощности, рабочих частот и полосы пропускания, степени функциональности и миниатюризации.

Электрическое соединение отдельных кристаллов в единый модуль является важным переходом от характеристик дискретных кристаллов к функциональной системе. В то время как монолитные интегральные схемы СВЧ имеют заметное продвижение вверх по частотному

диапазону, их электрический контакт друг с другом остается проблемным и ограничивающим фактором применения широкополосной ЭКБ СВЧ миллиметрового диапазона частот [1]. Снижение массогабаритных характеристик СВЧ-модулей, а также переход от однофункциональных схем к многофункциональным ведут к необходимости интеграции отдельных монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ с минимальными межсоединениями.

Гибридно-монокристалльные интегральные схемы (ГМИС) СВЧ являются основой современной отечественной ЭКБ СВЧ. Концепция ГМИС СВЧ – интеграция отдельных готовых кристаллов активных элементов (транзисторов и МИС СВЧ) с кристаллами и платами пассивных элементов.

Концепция ГМИС СВЧ имеет 3 стимула к применению. Первый – стоимость. Современные МИС СВЧ изготавливаются на подложках с эпитаксиально выращенными гетероструктурами. Гетероструктуры необходимы для формирования активных элементов – транзисторов и диодов. Однако активные элементы занимают менее 10 % площади МИС СВЧ. Остальную площадь занимает пассивная часть, не требующая наличия гетероструктуры. Формирование гетероструктуры на полуизолирующей подложке повышает стоимость пластины в 3...5 раз. Таким образом, эффективное использование площади кристаллов является необходимым условием снижения себестоимости модулей. Более того, миниатюризация кристаллов ведет к увеличению процента выхода годных. Чем меньше процент выхода годных кристаллов МИС СВЧ, тем экономически актуальнее применение концепции ГМИС СВЧ. Применение уже готовых кристаллов активных элементов снижает время изготовления готовых схем в 2–3 раза по сравнению с монокристалльной конструкцией [2]. Вторым стимулом – преодоление ограничения монокристалльных схем по площади и функциональности. На практике, предельные габаритные размеры МИС СВЧ составляют 5 × 5 мм по технологическим ограничениям. Предел по габаритам препятствует реализации многофункциональных схем. Третий – возмож-

ность интеграции разных полупроводниковых технологий. Кремний является главным материалом современной полупроводниковой электроники, позволяющим реализовывать схемы с высокой степенью интеграции, сложности и наименьшей стоимостью. Актуальная кремниевая КМОП-технология обеспечивает исполнение приемопередающих МИС СВЧ, объединяя на одном кристалле цифровую и аналоговую части малой мощности. Повышение характеристик приемопередатчиков с точки зрения выходной мощности, рабочих частот и шумовых параметров требует использования приборов на основе широкозонных полупроводников, полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов – НЕМТ (High Electron Mobility Transistor) и гетеропереходных биполярных транзисторов (ГБТ). Современные GaAs- и GaN-технологии обеспечивают беспрецедентный уровень выходной мощности в диапазоне до 100 ГГц. InP-технология обеспечивает наилучшие частотные и шумовые характеристики. Приборы на широкозонных полупроводниках являются незаменимыми элементами для развития систем связи пятого и шестого поколений [3]. В табл. 1 представлены характеристики транзисторов, выполненных по основным полупроводниковым технологиям со сравнимыми топологическими нормами, а в табл. 2 – параметры диэлектрических подложек, применяемых в микроэлектронике СВЧ.

Таким образом, достижение высоких характеристик системы требует применения не одной полупроводниковой технологии, а комбинации ряда полупроводниковых технологий – гетерогенной интеграции. Интеграция двух или более различных полупроводниковых техноло-

Табл. 1. Параметры транзисторов на различных полупроводниковых технологиях

Tab. 1. Parameters of semiconductor technology transistors

Технология	Длина затвора (ширина эмиттера), нм	F_T , ГГц	F_{max} , ГГц	Рабочее напряжение с-и (к-э), В	NF_{min} , дБ	Ссылка/Компания
GaAs pHEMT	135	100	180	4.5	1.1 на 30 ГГц	[4] / OMMIC
InP НЕМТ	100	180	350	1.2	<1 на 40 ГГц	[5] / Northrop Grumman
GaN/Si (SiC) НЕМТ	100	100	180	12	1.8 на 40 ГГц	[6] / OMMIC
SiGe БиКМОП	(120)	240	280	(0.6)	2 на 30 ГГц	[7] / STMicroelectronics
КНИ КМОП	130	140	100	1.2	2 на 15 ГГц	[8] / IBM

Табл. 2. Характеристики диэлектрических подложек, применяемых в микроэлектронике СВЧ

Tab. 2. Properties of dielectric substrates used in microwave microelectronics

Параметр	Символ	Сапфир	GaAs	InP	Si	SiC (4H)	C	GaN
Ширина запрещенной зоны, эВ	E_g	9.5	1.42	1.34	1.12	3.25	5.46	3.44
Пробивное напряжение, В/мкм	E_{br}	48	40	50	30	400	1000	500
Подвижность электронов, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	μ_n	–	8500	5370	1450	700	2200	1000
Дрейфовая скорость насыщения электронов, $\times 10^7 \text{ см/с}$	v_{sat}	–	2.1	2.5	1	2	2.7	2.2
Диэлектрическая проницаемость	ϵ_r	9.4	12.9	12.5	11.7	9.66	5.7	8.9
Тангенс угла диэлектрических потерь	–	0.0001	0.006	0.008	0.015	0.003	0.0003	–
Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$	Θ	46	52	68	130	450	1800	130
Коэффициент термического расширения, $\times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	–	4.5	5.73	4.75	2.6	5.12	1	$a = 5.59,$ $c = 3.17$
Постоянная кристаллической решетки, Å	–	–	5.65	5.87	5.43	$a = 3.1,$ $b = 10$	3.57	$a, b = 3.2,$ $c = 5.2$

гий, обеспечивающая расширение функциональности и улучшенные рабочие характеристики, является актуальной проблемой современной ЭКБ СВЧ. Современный уровень и тенденции развития конструктивных подходов интеграции микроэлектроники СВЧ требуют детального анализа.

В данной статье представлен обзор современных подходов к интеграции разных полупроводниковых технологий для применения в микроэлектронике СВЧ. В работе последовательно описываются 8 методов интеграции: монолитная гетерогенная интеграция; монтаж пластина-к-пластине; метод переноса слоев; интеграция в единую подложку; интеграция методом печати; интеграция проволоками; перевернутый монтаж; hot-via. Рассматриваются конструктивные подходы к интеграции, этапы реализации, достоинства и недостатки.

Монолитная гетерогенная интеграция. Монолитная гетерогенная интеграция – интеграция приборов на разных полупроводнико-

вых материалах, электрически соединенных между собой, сформированных в едином технологическом цикле на одной подложке. Этот термин фактически применяется при интеграции различных $A^{III}B^V$ -приборов с Si-КМОП в одной плоскости. Применение монолитной интеграции для объединения широкозонных полупроводниковых приборов с кремниевой КМОП-технологией может обеспечить уменьшение массогабаритных характеристик, сокращение электромагнитных помех, повышение эффективности, производительности и надежности.

Возможность монолитной интеграции $A^{III}B^V$ -приборов на кремний активно исследуется с 1980-х гг. Исторически, широкозонные полупроводники не изготавливались на кремниевых производственных линейках из-за меньшего диаметра пластин и проблем с загрязнением. Дополнительными сдерживающими факторами являются разница параметров постоянных кристаллических решеток и коэффициентов теплового расширения. Рассогласо-

вание по параметрам постоянных решеток приводит к большому количеству дефектов в растущем слое материала, а также возникновению напряжений вследствие значительного различия коэффициентов линейного расширения. Для минимизации кристаллических дефектов современные кремниевые КМОП-структуры и широкозонные полупроводники $A^{III}As$ и $A^{III}P$ преимущественно формируются на подложке с кристаллографической ориентацией $\langle 100 \rangle$, когда $A^{III}N$ формируется на $\langle 111 \rangle$. Постоянные кристаллические решетки GaAs и InP по сравнению с Si $\langle 100 \rangle$ различаются на 4 и 8 % соответственно. GaN имеет 17 %-ю разницу в кристаллической решетке с Si $\langle 111 \rangle$.

На практике возможны 2 основных подхода к интеграции. Первый – интеграция "островков" $A^{III}B^V$ в проводящую кремниевую подложку $\langle 100 \rangle$ [9]. Второй – на подложке кремния на изоляторе (КНИ) формирование Si-КМОП с $A^{III}B^V$, выращенными на основной подложке Si $\langle 111 \rangle$ [10]. Первый метод минимизирует достоинства близкой интеграции $A^{III}B^V$ -приборов с Si-КМОП для применения в СВЧ-диапазоне, так как основная неизолирующая кремниевая подложка оказывает сильный негативный эффект на общие параметры изделия в виде увеличения потерь в линиях передачи и индуктивностях. Необходимость обеспечения дополнительной изоляции $A^{III}B^V$ -приборов с Si-КМОП вносит дополнительные технологические трудности. В связи с этим первый подход применим только для низкочастотных схем.

Обобщенный процесс формирования Si-

КМОП и $A^{III}B^V$ -приборов на единой подложке можно разделить на 6 этапов:

- изготовление требуемой начальной подложки;
- формирование Si-КМОП;
- формирование окон для $A^{III}B^V$ -приборов;
- эпитаксиальный рост структур;
- формирование $A^{III}B^V$ -приборов;
- формирование металлических межсоединений.

Обычно КМОП-приборы формируются в первую очередь, так как этот процесс является более высокотемпературным, а материалы $A^{III}B^V$ сильнее восприимчивы к высоким температурам. Рост эпитаксиальных структур на GaAs и InP проходит при температурах более 500 °С, тогда как рост GaN – при 750 °С. Данные температуры существенно влияют и на характеристики КМОП-транзисторов. Таким образом, взаимное влияние технологического процесса изготовления приборов Si-КМОП и $A^{III}B^V$ является важной проблемой, ограничивающей применение данного метода интеграции.

Формирование структур на GaAs и InP на единой Si-подложке было продемонстрировано с применением пластины SOLES (Soitec's Silicon On Lattice Engineered Substrate). Типичная структура приведена на рис. 1, а. Формирование структуры на GaAs требует применения подслоя Ge для минимизации рассогласованности кристаллических решеток. Формирование структур на InP, помимо подслоя Ge, требует применения буферного слоя GaAs. Ge как подслоем получил наибольшее распространение,

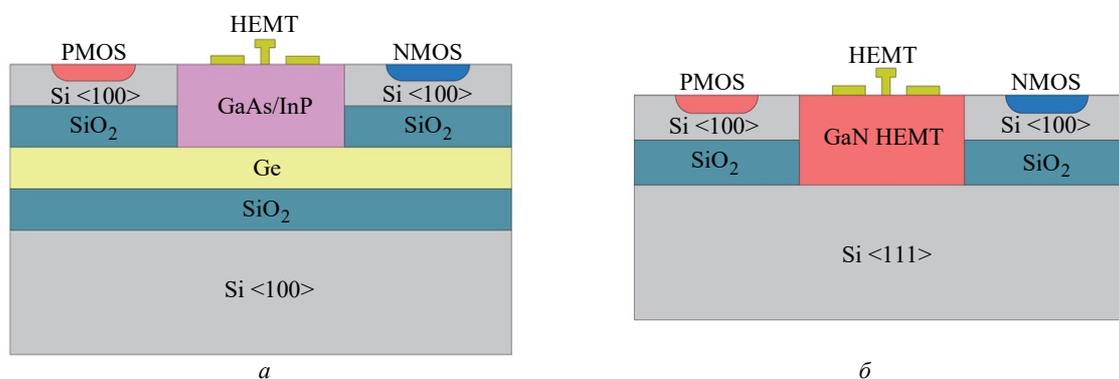


Рис. 1. Схематичное представление монолитной гетерогенной интеграции:
 а – Si-КМОП и GaAs/InP HEMT (либо ГБТ) на SOLES; б – Si-КМОП и GaN HEMT на SOI

Fig. 1. Schematic representation of monolithic heterogeneous integration:
 а – Si-CMOS with GaAs/InP HEMT (or HBT) on SOLES; б – Si-CMOS and GaN HEMT on SOI

поскольку характеризуется хорошей смешиваемостью с Si, обладает зрелой технологией выращивания Ge-on-Si и имеет схожие значения постоянной кристаллической решетки с GaAs. Буферный слой $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ обеспечивает эффективную релаксацию. Верхний слой Ge служит виртуальной подложкой для дальнейшего роста GaAs.

Реализация данного подхода не нашла широкого применения ввиду некоторых технологических ограничений. Так, промежуточный слой Ge имеет температуру плавления 938 °С, что ограничивает диапазон температур при изготовлении КМОП на кремнии. Также Ge вызывает перекрестное легирование с GaAs, что ухудшает характеристики GaAs pHEMT [11]. Буферные слои большой толщины являются ограничением для планаризации конструкции. Начальная подложка, необходимая для формирования требуемой полупроводниковой структуры, на сегодняшний день является предметом ограниченного распространения с крайне высокой стоимостью [12].

Интеграция структур на GaN имеет предпосылки к внедрению в цепочку производства кремниевых схем. GaN является химически стабильным во всем температурном диапазоне, применяемом в производстве кремниевых КМОП. Возможное совмещение процессов на 200 мм кремниевых пластинах, где технология GaN на кремнии интегрирована со стандартной технологией изготовления КМОП, может быть применена как для области высоких частот, так и для силовой электроники. Типичная структура интеграции приборов на GaN и Si-КМОП представлена на рис. 1, б. GaN и кремниевые транзисторы интегрированы не вертикально, а в единой плоскости. Одними из первых данный подход был реализован группой из Raytheon [13]. Немаловажным недостатком данного подхода является высокая стоимость ввиду селективного роста эпитаксиальных слоев, обеспечивающегося методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Несмотря на то, что в типичной интегральной схеме всего 10 % площади занимает GaN HEMT, цена процесса эпитаксии идентична со всей пластиной. Следовательно, при таком подходе стоимость площади GaN-структуры в 10 раз больше.

За последние 30 лет наблюдался значительный прогресс в интеграции $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ -приборов и Si-

КМОП на единой кремниевой подложке. Данный подход гетерогенной интеграции, обладающий минимальными длинами межсоединений и массогабаритными характеристиками, обеспечит новый класс схем с высокими характеристиками, объединяя цифровую обработку, смешение сигналов и аналоговое преобразование. Это расширяет возможности существующих систем и делает возможным новые архитектуры для широкого перечня применений. Отдельной перспективной областью для приборов с повышенными характеристиками для радиоэлектронной аппаратуры нового поколения является применение алмазной диэлектрической подложки и интеграция на ней разных полупроводниковых структур: Si-КМОП и GaN HEMT [14].

Однако, несмотря на заметное технологическое продвижение в монолитной интеграции $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ -приборов на кремниевую подложку и конструктивные преимущества, данный подход остается лишь одним из потенциальных направлений развития будущей микроэлектроники СВЧ. Важными предпосылками, требуемыми для практического применения данного подхода, станут решение ряда фундаментальных проблем, связанных с разницей в значениях постоянных кристаллических решеток, коэффициентов температурного расширения [15]. Требуется уменьшение взаимного влияния технологического процесса изготовления схемы на КМОП- и $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ -приборы. Помимо этого метод должен быть экономически конкурентным с аналогичными подходами гетерогенной интеграции.

Монтаж пластина-к-пластине. Монтаж пластина-к-пластине (wafer bonding) – процесс интеграции изделий на уровне изготовления пластин посредством соединения пластин со сформированными приборами. Данный подход является альтернативным к монолитной интеграции.

Обобщенный процесс объединения состоит из двух основных этапов. На первом этапе соединяются друг с другом две пластины со сформированными активными элементами. Соединение двух пластин обеспечивается за счет металлических или диэлектрических слоев, либо их совокупности – гибридного монтажа (hybrid bonding) [16]. На втором этапе формируются отверстия как в одной, так и в другой пластинах, финальная металлизация, объединяющая элементы.

Важными условиями интеграции данным методом являются одинаковые размеры соединяемых пластин, применение соединяющих металлических либо диэлектрических слоев, совместимых с двумя интегрируемыми полупроводниковыми технологиями, и обеспечение шероховатости поверхностей менее 1 нм [17, 18]. Для планаризации соединяемых поверхностей необходима химико-механическая полировка. Совместимость технологических процессов соединяемых пластин составляет одну из основных задач, решение которой необходимо для реализации данного подхода. Совместимость с технологическим процессом Si-КМОП подразумевает отказ от использования Au и процессов взрывной литографии – укоренившихся составляющих технологического процесса производства $A^{III}B^V$ -приборов.

Структуры на основе GaN имеют наибольшие предпосылки интеграции методом монтажа пластина-к-пластине благодаря высокотемпературной стабильности приборов на их основе. Также появилась возможность реализации GaN-гетероструктур на пластинах высокоомного кремния диаметром 200 мм [17]. Группа из Raytheon ведет работы по реализации пластины GaN на Si, изготовленной в кремниевой технологической цепочке, и последующей интеграции с пластиной Si-КМОП [19]. Схематичное представление реализуемой концепции представлено на рис. 2.

Выходные характеристики экспериментальных образцов GaN НЕМТ на кремниевой подложке, изготовленных по технологической цепочке без процессов взрывной литографии и использования Au, показывают сопоставимые значения со стандартными приборами. Выход-

ная мощность тестовых транзисторов 2×100 мкм с длиной затвора 0.15 мкм превышает 4.5 Вт/мм при КПД 50 % на частоте 10 ГГц. Электрическое соединение между GaN НЕМТ и Si-КМОП обеспечивается сквозными металлизированными отверстиями в Si. Металлизация выполнена из Cu.

Также имеются экспериментальные результаты по интеграции пластина-к-пластине приборов на InP с Si-КМОП. В [18, 20] представлены результаты интеграции InP ГБТ с Si-КМОП или БиКМОП. Благодаря плотной интеграции разных полупроводниковых приборов реализованы приемопередатчики Ka- и W-диапазонов частот в виде единого кристалла, где реализованы как цифровая, так и аналоговая части.

Монтаж пластина-к-пластине обеспечивает высокую плотность интеграции и минимальные габариты благодаря вертикальной интеграции приборов. Недостатками данного подхода являются как снижение процента выхода годных из-за концепции монтажа пластина-к-пластине, так и ограничение в диаметре пластин (до 100 или 150 мм) при интеграции с большинством пластин с $A^{III}B^V$ -приборами. Совместимость технологических процессов также является важным фактором, сдерживающим массовое внедрение данного подхода. Кроме того, при гетерогенной интеграции наблюдается неэкономичное использование пластины с $A^{III}B^V$ -приборами. Данный подход экономически целесообразен при высоком проценте $A^{III}B^V$ -приборов в финальной интеграции, поэтому он наиболее применим при интеграции пластин, реализованных по единой технологии. Гетероинтеграция в данном подходе предусматривает совместимость ряда этапов

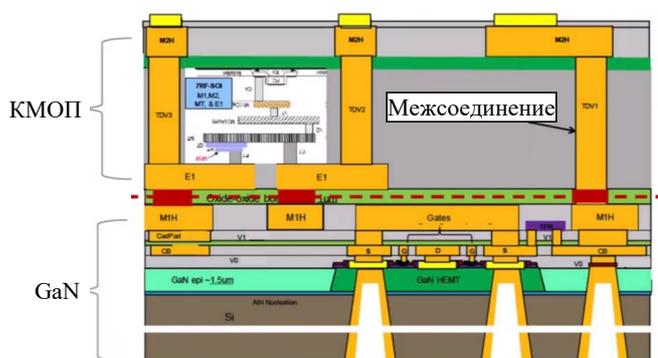


Рис. 2. Схематичное представление интеграции пластины GaN HEMT на кремнии с пластиной Si-КМОП [19]

Fig. 2. Schematic representation of wafer bonding GaN HEMT on Si with Si-CMOS [19]

производства соединяемых пластин, что зачастую требует корректировки части технологических процессов.

Метод переноса слоев. Метод переноса слоев (micro-transfer printing) – технология локального переноса определенных полупроводниковых слоев с одной подложки (донорной) на финальную пластину. Данная технология позволяет интегрировать приборы, реализованные на материалах с несовпадающими показателями кристаллических решеток, расширяя функциональность и повышая характеристики, компактно объединяя разные полупроводниковые материалы.

Гетероструктуры $A^{III}B^V$ содержат весь необходимый функционал, требуемый для работы активного прибора СВЧ. Отделение структуры от подложки и ее перенос является стремлением к увеличению плотности интеграции разных полупроводниковых приборов, минимизации лишних элементов. Метод переноса слоев активно применяется в полупроводниковой фотонике [21].

Обобщенный принцип реализации метода переноса слоев можно разделить на 6 основных этапов. Схематичное представление процессов представлено на рис. 3. Изготавливается донорная пластина с требуемыми элементами. Первым этапом является формирование локальных областей структур на донорной пластине. Далее локально наносится защитный слой, который в дальнейшем будет обеспечивать контакт с трафаретом и остаточный контакт с донорной пластиной. Защитным слоем может служить либо фоторезист, либо диэлектрик. Третий этап – отсоединение структур от подложки. Существует

несколько способов отсоединения: селективным травлением; лазерным; ионным; либо механическим воздействием [22, 23]. Четвертый и пятый этапы – перенос элементов с донорной пластины на финальную с помощью трафарета. Разработан целый ряд подходов к переносу элементов, наиболее применяемым из которых является использование эластомера из полидиметилсилоксана. По причине высокой адгезии трафарета и переносимого прибора при резком движении трафарета с места контактирования с прибором соединения с донорной пластиной рвутся, позволяя поднять прибор с донорной пластины. Противоположный подход используется для интеграции прибора на финальную пластину, трафарет плавно отодвигается от соединенной поверхности, обеспечивая меньшую адгезию между трафаретом и прибором, чем силы сцепления с финальной подложкой. Шестой этап – удаление защитного слоя. После процесса переноса электрические соединения добавляются стандартными технологическими процессами с применением тонкопленочного напыления и фотолитографии.

Структуры на GaN имеют предпосылки для интеграции методом переноса слоев – изменение в составе материалов от кремния до последовательности гетероструктур на GaN позволяет легко убирать лежащий внизу кремний анизотропным травлением. Текущие экспериментальные результаты по интеграции GaN НЕМТ на кремниевую пластину с реализованной КМОП пока применимы больше для силовой электроники [24]. Метод переноса слоев при-

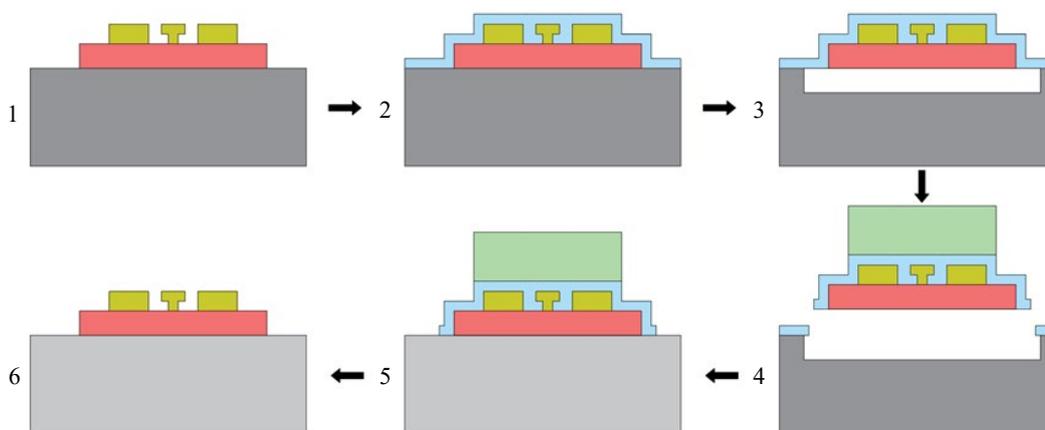


Рис. 3. Схематичное представление процесса микропереноса слоев

Fig. 3. Schematic representation of micro-transfer printing process

влекателен в том случае, когда монолитная интеграция либо затруднительна, либо невозможна. Так, в [25] приведены экспериментальные результаты интеграции GaN НЕМТ на алмазную подложку. Также имеются экспериментальные данные по применению данного подхода для интеграции InP НВТ на кремниевую пластину [18].

Интеграция методом переноса слоев является потенциальным подходом к интеграции приборов, выполненных по разным полупроводниковым технологиям. Метод переноса слоев выступает в качестве конкурирующего подхода с монолитной гетероинтеграцией. Достоинствами данного подхода являются минимальные длины межсоединений между приборами на разных материалах и массогабаритные характеристики, эффективное использование донорной пластины. Подобный метод может найти широкое применение при необходимости переноса большого массива элементов для быстрого монтажа миниатюрных элементов. Недостатки данного подхода включают необходимость связи минимум двух разных полупроводниковых процессов, ограниченные размеры переносимого объекта – около 0.6×0.6 мм, а также проблемы с планарностью при больших толщинах гетероструктур.

Интеграция в единую подложку. Метод интеграции в подложку предполагает, что на основную полупроводниковую пластину, в местах углублений, интегрируются готовые кристаллы элементов, в дальнейшем соединяемые друг с другом с применением методов фотолитографии (рис. 4). Данный метод в разных источниках имеет различные названия: interposer-based monolithic microwave integrated circuit (iMMIC) [26]; quasi-monolithic integration technology (QMIT) [27]; metal embedded chip assembly

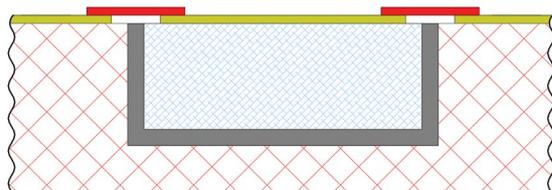


Рис. 4. Схематическое представление интеграции в подложку
Fig. 4. Schematic representation of embedded chip assembly method

bly for microwave integrated circuits (MECAM-IC) [2, 28]; embedded-IC package [29].

Данный подход является развитием традиционной концепции ГМИС с проволочными соединениями – использование готовых кристаллов активных элементов (транзисторов и МИС), их интеграция с кристаллами пассивных элементов проволочными соединениями. Интеграция в подложку обеспечивает избавление от проволочных соединений, тем самым уменьшая электрические паразитные характеристики межсоединений и снижая габаритные характеристики. Применение готовых кристаллов активных элементов и их интеграция с пассивными частями обеспечивают уменьшение стоимости однофункциональных схем, например усилителей мощности на GaN НЕМТ, в связи с тем, что дорогостоящий кристалл со структурами GaN на подложке SiC ограничен активным прибором, а пассивная часть реализуется монолитно на более дешевых подложках полуизолирующих GaAs или Si.

Процесс интеграции в подложку обеспечивается на этапе производства обобщающей пластины. В обобщающей подложке формируется полость для размещения готового кристалла. Соединение кристалла с обобщающей подложкой обеспечивается стандартными технологическими процессами изготовления обобщающей подложки с применением тонкопленочного напыления и фотолитографии. В [2, 26, 28] представлены результаты реализации усилителей мощности S-, X- и W-диапазонов частот, где в кремниевую полуизолирующую подложку с пассивными элементами интегрирован кристалл GaN-транзистора. Представленные усилители имеют повышенный уровень интеграции в совокупности с эффективным использованием дорогостоящих кристаллов активных элементов на гетероструктурах в сочетании с пассивными платами на полуизолирующих подложках, объединенных на уровне изготовления пластины с пассивными платами. Типичный процесс интеграции и фотолитографии усилителей представлены на рис. 5.

Частный случай интеграции в подложку – metal-embedded chip assembly (MECA) (бывший Integrated thermal array plate (ITAP)) – метод интеграции в подложку, обеспечивающий



Рис. 5. Типичный процесс интеграции в подложку (а) и фотографии изготовленных усилителей мощности X-диапазона частот (б) [26]

Fig. 5. Typical embedded chip assembly fabrication process (a) and fabricated X-band power amplifier (b) [26]

повышенные тепловые характеристики. Данный подход подразумевает интеграцию кристаллов в медный теплоотвод, который имеет одинаковую толщину с кремниевой распределительной платой. Контакт между обратной стороной кристаллов и теплоотводом без соединяющего слоя улучшает тепловые характеристики по сравнению с традиционными методами. Межсоединения, реализованные воздушными мостами между кристаллами и платами, заменяют проволочные соединения и обеспечивают минимальное расстояние между кристаллами 70 мкм с возможностью его уменьшения до 30 при дальнейшей оптимизации процесса [30]. Данный метод подразумевает использование кремниевых пластин большого диаметра.

Метод интеграции в подложку позволяет объединять не только полупроводниковые кристаллы, но и другие приборы, применяемые в микроэлектронике СВЧ. Одним из перспективных направлений применения данного метода является близкая интеграция ферритовых изделий с МИС СВЧ. В [31] представлены результаты интеграции циркулятора из поликристаллического гексаферритного магнитного материала с приемопередающим модулем СВЧ, состоящим из малошумящего усилителя (МШУ) и усилителя мощности (УМ) на GaN/SiC на уровне пластины, фотография которого представлена на рис. 6. Результатом является ГМИС приемопередатчика Ка-диапазона частот, в ко-

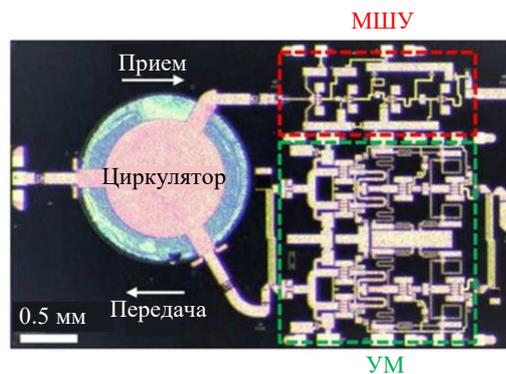


Рис. 6. МИС приемопередатчика размером 4.7×2.87 мм [31]

Fig. 6. T-R MMIC with chip size of 4.7×2.87 mm [31]

торую интегрирован циркулятор. Это обеспечивает снижение габаритов больше чем в 100 раз в сравнении с традиционным подходом.

Метод интеграции в подложку находит все более широкое применение при построении как однофункциональных, так и многофункциональных схем СВЧ с малыми габаритными характеристиками. Реализация концепции ГМИС – использование годных кристаллов и пассивных плат на полужолирующих подложках – способствует снижению стоимости конечных изделий и обеспечивает повышение процента выхода годных. Достоинствами данного подхода являются планарность полученной интеграции, экономичное использование площади кристаллов с гетероструктурами и небольшие паразитные составляющие переходных межсоединений в СВЧ-диапазоне. Различные варианты реали-

зации данного подхода могут обеспечить повышенные тепловые характеристики, интеграцию неполупроводниковых материалов. Недостатки – необходимость применения полупроводниковых технологических этапов, что ведет к повышенной сложности технологических процессов интеграции. Рассматриваемый подход предъявляет повышенные требования к повторяемости габаритных размеров кристаллов, точности их позиционирования.

Интеграция методом печати. Интеграция методом печати – электрическое соединение отдельных кристаллов с подложкой с применением аддитивных технологий. Аддитивные технологии могут быть использованы для создания линий передачи, антенн, кристалльных межсоединений, соединительных и изолирующих слоев и 3D-конструкций [32]. Одним из основных стимулов развития данного подхода является снижение паразитных характеристик межсоединений с целью улучшения характеристик модулей в миллиметровом диапазоне частот. Развитие методов аддитивных технологий, основанных на микродозировании с возможной последующей обработкой, позволило формировать линии шириной до 10 мкм с точностью ± 6 мкм [33].

Интеграция методом печати позволяет изготавливать многокристальные модули с быстрым этапом макетирования и возможностью оптимизации конструкции. На рис. 7 представлен результат реализации приемопередатчика W-диапазона с применением аддитивных технологий [33]. Перспективным направлением

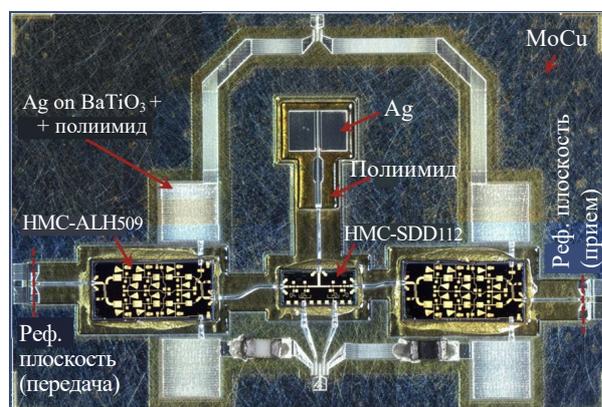


Рис. 7. Приемопередатчик W-диапазона, реализованный с применением аддитивных технологий [33]

Fig. 7. Fabricated W-band transceiver implemented using additive technologies [33]

применения аддитивных технологий является формирование 3D-антенн для миллиметрового диапазона длин волн [34].

Достоинством данного подхода является возможность автоматизации и скорость разработки модулей, упрощение процессов интеграции, так как не требуется использования полупроводниковых технологических процессов. Однако данный подход не может похвастаться большими производственными мощностями, как и исключительными электрическими параметрами ввиду ограниченных технологических возможностей формирования межсоединений. Также необходима отдельная дорогостоящая автоматизированная платформа для интеграции.

Метод интеграции с применением аддитивных технологий не имеет на данный момент очевидных преимуществ по сравнению с конкурентными методами интеграции, однако у него большие перспективы с точки зрения автоматизированной интеграции мелкосерийного производства.

Интеграция проволоками. Проволочный метод интеграции кристаллов – механическое соединение кристаллов на основании с помощью вспомогательного соединяющего слоя и электрическое соединение проволоками. Концепция интеграции кристалла на подложку проволочным методом представлена на рис. 8. Электрическое соединение кристалла с подложкой проволоками является зрелым процессом и превалирует в современном процессе сборки кристаллов СВЧ. Обычно тонкие металлические проволоки диаметром 15...25 мкм соединяют контактные площадки кристалла и основания. Обратная сторона кристалла монтируется к основанию с помощью соединяющего слоя.

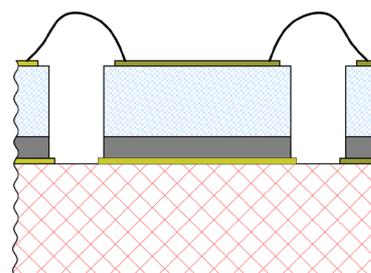


Рис. 8. Проволочный метод интеграции кристаллов

Fig. 8. Schematic representation of wire bond integration

Главное достоинство данного подхода – его простота, зрелость и распространенность технологии, небольшие требования к плоскопараллельности и шероховатости кристалла и основания, невысокая стоимость. Интеграция проволоками применяется при построении как однофункциональных схем, их корпусировании, так и интеграции МИС в многофункциональную систему [35].

В [36] показан пример реализации усилителя мощности X-диапазона частот, где кристалл GaN-on-Si с предусилителем и выходными транзисторами интегрирован золотыми проволоками с кристаллом выходной согласующей цепочкой на полуизолирующем арсениде галлия (рис. 9). Разработанный усилитель имеет выходную мощность свыше 18 Вт при коэффициенте усиления более 27 дБ в диапазоне частот 9.5...11.5 ГГц. Его габаритные размеры 5.5×3.8 мм, а расчетная стоимость в 2 раза ниже по сравнению с усилителем, реализованным на едином кристалле на GaN-on-SiC.

Подобная технология монтажа трудоемка, так как соединения между кристаллом и подложкой делаются последовательно. Для кристаллов с большим количеством выводов процесс может оказаться достаточно длительным. Плотность выводов кристалла также ограничена, так как они в данном случае являются периферийными элементами схемы. Контактные площадки для интеграции проволоками занимают большую площадь на кристалле, а последовательный планарный контакт монолитных схем ограничивает

минимальные габаритные характеристики модуля СВЧ.

Современные методы механического контакта обратной стороны кристаллов с основанием вносят существенный вклад в тепловое сопротивление сборки, ухудшая тепловые режимы работы схемы, что снижает надежность, так как подразумевает применение клея либо припоя с толщиной около 20 мкм и невысокой теплопроводностью (50...60 Вт/(м·К)).

Еще один важный недостаток проволочных соединений – ухудшение характеристик на высоких частотах ввиду значительных паразитных составляющих. Это является ключевой проблемой для интеграции схем, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн. Главная паразитная составляющая проволочек – индуктивность, которая увеличивается пропорционально длине межсоединения. Частотные характеристики ограничены, так как паразитные составляющие переходных межсоединений вносят искажения, которые невозможно компенсировать идеальными сосредоточенными элементами уже на 40 ГГц, что является худшим результатом среди подходов к интеграции [37]. Длинные проволочные соединения являются источниками излучения, повышающими электромагнитные связи, что ухудшает изоляцию и может стать причиной нестабильности схемы.

Несмотря на то, что на данный момент проволочный метод является основой современной интеграции в микроэлектронике СВЧ, его пределы по частотным характеристикам и плотности интеграции ограничивают получение максимальных характеристик от МИС СВЧ.

Перевернутый монтаж. Интеграция кристаллов методом перевернутого монтажа (flip-chip) – соединение кристалла активной лицевой стороной с подложкой механически и электрически, используя проводящие межсоединения – "бампы". Концепция интеграции кристалла на подложку методом перевернутого монтажа представлена на рис. 10. Актуальность данного подхода определяется развитием широкополосной радиоэлектронной аппаратуры миллиметрового диапазона длин волн, концепции ГМИС в области миниатюризации и гетероинтеграции и технологии формирования

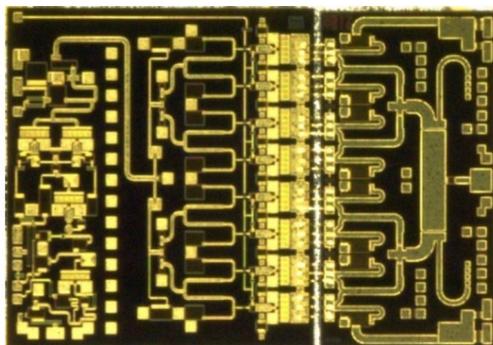


Рис. 9. УМ X-диапазона частот с GaAs-платой выходной согласующей цепи [36]

Fig. 9. X-band power amplifier with GaAs MMIC output matching circuit [36]

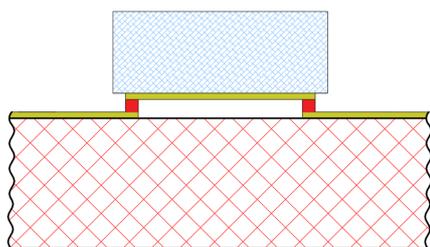


Рис. 10. Концепция интеграции кристалла методом перевернутого монтажа

Fig. 10. Schematic representation of flip-chip integration

переходных межсоединений, обеспечивающей миниатюризацию и совместимость с технологией изготовления АШВ^V-кристаллов. Интеграция методом перевернутого монтажа обеспечивает одновременное соединение между большим количеством контактных площадок основания и кристалла, минимальные потери и паразитные составляющие переходных межсоединений в СВЧ-диапазоне, а в перспективе и улучшенный теплоотвод от активной области прибора.

Начало развития технологии flip-chip относится к 1964 г., когда компания IBM разработала технологию С4 (Controlled Collapse Chip Connection) для сборки интегральных схем. Технология flip-chip стала важной частью в цифровой микроэлектронике, тогда как в СВЧ-области не нашла широкого распространения. Одна из причин состоит в том, что типичная технология flip-chip не может быть перенесена для применения в СВЧ-области. Способ формирования переходных межсоединений – "бампов", их высота, диаметр и применяемые материалы требуют изменения для стыковки с тех-

нологией МИС СВЧ, выполненных на широкозонных полупроводниках, миниатюризации и обеспечения низких паразитных электрических составляющих в СВЧ-диапазоне [38].

Обобщенный процесс монтажа методом flip-chip состоит из трех основных этапов. Первый – формирование проводящих межсоединений ("бампов") на контактных площадках кристалла или подложки. Второй – монтаж, совмещение кристалла с подложкой и соединение первого лицом вниз при заданных внешних условиях (температура, время и давление). Третий – заполнение вспомогательным материалом пустот между кристаллом и подложкой – инкапсуляция. Последняя обеспечивает улучшение термомеханических свойств, вызванных несоответствием КТР кристалла и подложки, а также защищает кристалл от влаги, загрязнений и механических повреждений при различных внешних факторах. Однако присутствие вспомогательного материала влияет на электрические характеристики системы, особенно на высоких частотах, в связи с его более высокими диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла диэлектрических потерь в сравнении с воздухом. Третий этап в отдельных случаях может быть опущен, особенно в схемах миллиметрового диапазона длин волн.

Бурное развитие способов формирования "бампов", способствующее миниатюризации, повышению рабочего диапазона температур и надежности переходных межсоединений и сборок на их основе, открывает новые возможности применения метода перевернутого монтажа. Схематичное представление эволюции переходных межсоединений иллюстрирует рис. 11.

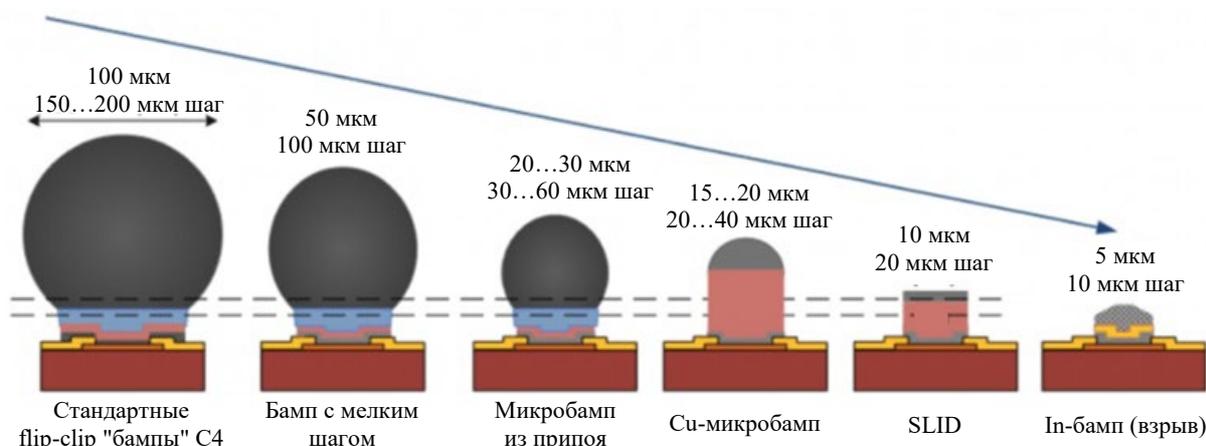


Рис. 11. Схематичное представление эволюции переходных межсоединений [39]

Fig. 11. Schematic representation of bump interconnect evolution [39]

Технология формирования проводящих межсоединений развивается более 60 лет. В общем, данный процесс можно разделить на 3 поколения. Первое поколение подразумевает использование шариков припоя и флюса. Типичный размер межсоединений первого поколения обеспечивает шаг между выводами более 100 мкм. Второе поколение, часто именуемое как micro-bump или C2 (chip connection), реализуется как контактная площадка из меди, покрытая припоем; обеспечивает шаг между выводами от 40 до 130 мкм. Первые 2 поколения имеют значительный объем легкоплавных припоев в межсоединении. Их присутствие ограничивает область применения радиоэлектронной аппаратуры из-за уменьшения рабочего температурного диапазона [40].

Третье поколение межсоединений обеспечивает шаг между выводами 30 мкм и менее. Существующие процессы с использованием припоев не могут обеспечить масштабирование межсоединений до указанных размеров. В связи с этим для реализации межсоединений с отмеченными размерами применяются методы термокомпрессии Cu-Cu [41], Au-Au [42] либо метод монтажа взаимной переходной диффузией (*англ.* сокр. SLID – Solid-Liquid Interdiffusion) с разными составляющими материалами [43]. Ведутся работы по созданию переходных межсоединений, обеспечивающих широкополосное соединение с рабочей полосой свыше 150 ГГц и интеграцию, близкую к монолитной [38, 44, 45]. Технология реализации переходных межсоединений с возможностью локального контакта кристаллов с шагом в единицы микрометров до сих пор является актуальной задачей в микроэлектронике СВЧ.

Интеграция методом перевернутого монтажа все шире применяется в маломощных системах миллиметрового диапазона благодаря таким преимуществам, как минимальные потери и паразитные составляющие соединений (не требуется компенсирующих согласующих элементов) и относительная простота технологии [46], а в X-диапазоне показывают улучшенные характеристики по сравнению с распространенным методом монтажа с помощью проводных соединений [47]. Достоинством концепции интеграции методом перевернутого монтажа является возможность использования

кристаллов, выполненных по разным технологическим процессам.

На текущий момент метод перевернутого монтажа имеет ряд ограничений. Монтаж методом flip-chip приводит к близкому расположению активной поверхности кристалла с подложкой, которые разделены воздушным зазором в высоту переходного межсоединения. Подобная близость существенно влияет на электрические характеристики кристалла. Данное явление называется эффектом рассогласования. Элементы схемы на кристалле могут изменить свои электрические характеристики в связи с присутствием подложки в непосредственной близости. Степень рассогласования зависит от типа элемента и размера зазора между кристаллом и подложкой, который контролируется высотой бампа. Присутствие металлизации под кристаллом сильно увеличивает эффект [48]. Большая высота бампа минимизирует рассогласование, однако увеличивает паразитные характеристики переходного соединения. На практике чувствительны к эффекту рассогласования линии передачи и спиральные индуктивности, в то время как транзисторы и компоненты малых размеров не отличаются значительной восприимчивостью. В связи с этим интеграция кристаллов с реализованной микрополосковой конструкцией требует детального просчета и учета данного эффекта.

Еще одной актуальной проблемой при интеграции методом перевернутого монтажа является отвод тепла. Концепция контакта кристалла лицевой стороной при методе перевернутого монтажа обеспечивает кратчайший электрический путь соединения с основанием, однако ограниченная площадь контакта (обычно менее 10 % от площади кристалла) и его удаленность от области тепловыделения увеличивают тепловое сопротивление схемы, что ведет к повышенным температурным режимам работы и, как следствие, к снижению электрических характеристик и надежности схемы.

Один из способов улучшения отвода тепла – использование обратной стороны кристалла, ее контакт с высокотеплопроводным материалом. В [49] представлены экспериментальные данные применения указанного подхода, где в предложенной конструкции корпусирования

кристалл усилителя мощности, реализованного на 0.25 мкм GaN HEMT-технологии, монтируется лицевой стороной на подложку, а обратная сторона контактирует с медным теплоотводом. Рассеиваемая мощность в эксперименте от МИС СВЧ-усилителя размером 5.0×2.5 мм составила от 6 до 20 Вт. Интеграция кристалла внесла минимальные искажения в частотные характеристики схемы в диапазоне 0...14 ГГц, однако, несмотря на присутствие дополнительного отвода тепла от обратной стороны кристалла, наблюдается повышение рабочего температурного режима, что свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования конструкции. Другой способ повышения отвода тепла – увеличение площади контактирования лицевой стороны кристалла с подложкой в области, близкой к области тепловыделения. Результаты расчета показывают, что возможно даже улучшение температурных режимов, по сравнению с традиционным методом интеграции кристалла обратной стороной на теплоотводящее основание [50, 51]. Данный подход требователен к точности формирования соединяющих слоев, их размеров и к точности совмещения, что еще раз подчеркивает актуальность технологии реализации переходных межсоединений с возможностью локального контакта кристаллов с шагом в единицы микрометров.

Интеграция методом перевернутого монтажа на сегодняшний день является наиболее быстроразвивающимся подходом в области построения СВЧ-модулей на основе гибридно-монолитной интеграции. Такие достоинства подхода, как минимальные потери и паразитные составляющие переходных межсоединений в СВЧ-диапазоне [1], возможность использования готовых кристаллов, реализованных по разным полупроводниковым технологиям и с разными габаритами, одновременное соединение большого количества контактных площадок кристалла с основанием, возможность монтажа на уровне пластины и плотность интеграции, близкая к монолитной, позволяют реализовывать компактные радиоэлектронные модули миллиметрового диапазона частот [52]. Недостатки данного подхода – эффект рассогласования, существующие ограничения по тепловому режиму и повышение требований к пло-

скопараллельности и шероховатости поверхностей кристаллов и оснований при переходе к размерам межсоединений менее 20 мкм – остаются теми факторами, которые замедляют масштабное применение метода перевернутого монтажа в микроэлектронике СВЧ. Актуальными проблемами данной конструкции остаются улучшение отвода тепла от активной области и технология реализации переходных межсоединений с возможностью локального контакта кристаллов с шагом в единицы микрометров.

Hot-via. Интеграция кристаллов методом перевернутого монтажа больше применима для схем с копланарными линиями, чем с микрополосковыми, в связи с появлением эффекта рассогласования из-за близости кристалла с подложкой. Однако в большинстве современных ИС применяются именно микрополосковые линии, как наиболее подходящие для мощных схем. Модифицированная конструкция перевернутого монтажа ("hot-via" или "direct backside interconnect technology" (DBIT) – технология прямого соединения обратной стороной) была предложена в конце XX в. как альтернатива технологии перевернутого монтажа, совместимая с конструкцией микрополосковых линий [53]. Концепция данного подхода представлена на рис. 12.

Электрические выводы кристалла выведены на обратную сторону через сквозные металлизированные отверстия (так называемые hot-via). Металлизация обратной стороны должна иметь требуемую топологию, что повышает сложность изготовления схемы. Кристалл схемы соединяется обратной стороной с основанием с помощью либо бампов, либо соединяющего слоя, например фольги припоя. Метод монтажа hot-via обеспечивает одновременно электрическое, тепловое и механическое повторяемое соединение. Процесс интеграции состоит из тех же этапов, что и при перевернутом монтаже. Возможность реализации подоб-

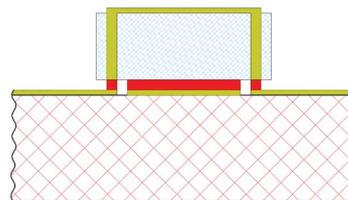
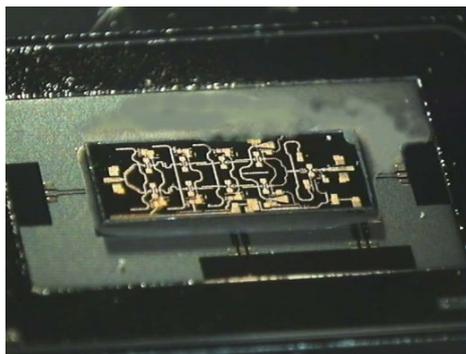
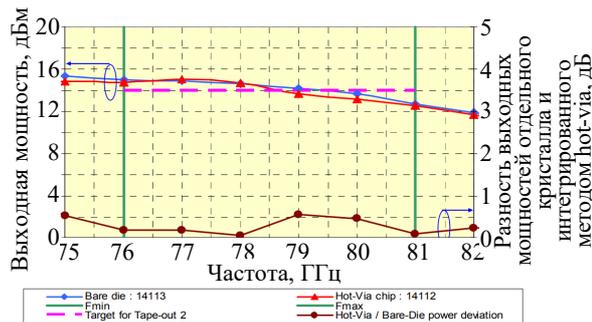


Рис. 12. Концепция интеграции кристалла методом hot-via

Fig. 12. Schematic representation of hot-via integration



a



б

Рис. 13. Фотография интегрированной МИС УМ W-диапазона частот (*a*) и частотные характеристики (*б*) [55]
 Fig. 13. Photograph of integrated W-band PA MMIC (*a*) and electrical characteristics (*б*) [55]

ной конструкции в СВЧ-диапазоне является следствием развития технологии формирования локальных проводящих межсоединений.

В миллиметровом диапазоне частот форма сигнального сквозного отверстия сильно влияет на характеристики электрического соединения. Например, сигнальное сквозное отверстие в виде квадрата со стороной 35 мкм в подложке толщиной 100 мкм имеет индуктивность около 40 пГн до частот 100 ГГц с тенденцией дальнейшего увеличения [54]. Практическое ограничение применения данного подхода по частотному диапазону составляет около 90 ГГц.

В [55] продемонстрирована интеграция ряда кристаллов для приемопередающего модуля W-диапазона частот. Фотография результатов интеграции и частотные характеристики представлены на рис. 13. Кристалл усилителя мощности, реализованного по технологии GaAs 0.15 рНЕМТ, интегрирован на кремниевую подложку. Соединяющие бампы из золота высотой около 45 мкм формируются на уровне пластины до резки на кристаллы, пустоты заполняются проводящим адгезивом. В диапазоне частот 76...81 ГГц усилитель имеет почти идентичную выходную мощность более 12 дБм как отдельного кристалла, так и интегрированного на подложку. Отсутствие сильных различий определяется использованием компенсирующих цепочек согласования на кристалле для применения интеграции методом hot-via.

Метод интеграции hot-via, как модификация метода перевернутого монтажа, имеет ряд достоинств по сравнению с перевернутым монтажом: лучшую совместимость с микрополосковым построением схем; возможность визуально-

го контроля после монтажа; отсутствие эффекта рассогласования. Однако подход hot-via не лишен недостатков: требуется формирование сигнальных сквозных отверстий, а обратная сторона должна иметь локальную металлизацию для разделения заземления и сигнальных контактных площадок; паразитные параметры межсоединения выше, чем у интеграции перевернутым монтажом, так как сквозное отверстие является частью пути сигнала.

Из-за специфических дополнительных технологических требований к кристаллам и повышенных паразитных составляющих переходных межсоединений данный подход имеет ограниченную область применения. Его дальнейшее совершенствование, как и метода перевернутого монтажа, во многом зависит от развития технологии формирования локальных переходных межсоединений.

Выводы. Целью данной статьи являлось проанализировать современные и перспективные направления конструктивных решений интеграции микроэлектроники СВЧ на основе разных полупроводниковых технологий. Развитие конструкций идет в области снижения межсоединений, уменьшения габаритов, повышения тепловых характеристик, повышения вариативности, снижения себестоимости. В табл. 3 представлены результаты сравнения исследованных методов интеграции.

Традиционный подход к интеграции – проволочный – имеет ограничения по рабочим частотам и приводит к относительно большим габаритам. Развитие подходов интеграции, обеспечивающих повышение функциональности и улучшенные рабочие характеристики, является

Табл. 3. Результаты сравнения характеристик методов интеграции

Tab. 3. Results of comparison of integration methods

Метод интеграции	Минимальная длина межсоединений	Концепция ГМИС	Интегрирующая подложка	Требования для реализации
Монолитная гетерогенная интеграция	>5 мкм	–	Si	Совместимость технологических циклов минимум двух полупроводниковых технологий
Монтаж пластина-к-пластине	>5 мкм	–	Si	Совместимость технологических циклов минимум двух полупроводниковых технологий
Метод переноса слоев	>5 мкм	+	Любая	Совместимость технологических циклов минимум двух полупроводниковых технологий
Интеграция в единую подложку	>70 мкм	+	Si/SiC/GaAs/C	Применение технологических этапов. Точное позиционирование
Интеграция методом печати	>100 мкм	+	Любая	Автоматизированная платформа для интеграции
Интеграция проволоками	>300 мкм	+	Любая	Нет
Перевернутый монтаж	>5 мкм	+	Любая	Локальный соединяющий слой
Hot-via	>75 мкм	+	Любая	Локальный соединяющий слой

актуальной проблемой современной ЭКБ СВЧ. Развитие подходов близкой интеграции идет как в монолитном направлении – монолитная гетерогенная интеграция и монтаж пластина-к-пластине, так и гибридно-монолитном – метод переноса слоев, интеграция в единую подложку, применение аддитивных технологий, перевернутый монтаж и hot-via.

Монолитная гетерогенная интеграция и монтаж пластина-к-пластине не реализуют концепцию ГМИС. Современные технологические ограничения и стоимость получаемого изделия являются ограничивающими факторами развития данных направлений. Метод переноса слоев также требует специальных технологических возможностей, что сдерживает его развитие и применение. Интеграция методом печати обеспечивает промежуточные электрические характеристики и габаритные размеры между методом проволочной интеграции и остальными методами, что делает применение подхода переходным этапом. Необходимость

специфичного дорогостоящего оборудования и технологические ограничения оставляют крайне ограниченную область для применения.

Интеграция в единую подложку из-за разных вариантов реализации позволяет обеспечить уникальные характеристики, например благодаря интеграции магнитных материалов. Данный метод подразумевает применение ряда полупроводниковых технологических этапов, что ведет к повышенной сложности технологических процессов интеграции.

Метод перевернутого монтажа обеспечивает минимальные потери и паразитные составляющие переходных межсоединений в СВЧ-диапазоне благодаря миниатюризации переходных межсоединений. Hot-via, как модификация метода перевернутого монтажа, обеспечивает лучшую совместимость со схемами с микрополосковыми линиями. Их дальнейшее совершенствование и массовое применение во многом зависят от развития технологии формирования локальных переходных межсоединений.

Список литературы

1. Connecting Chips with More Than 100 GHz Bandwidth / W. Heinrich, M. Hossain, S. Sinha, F.-J. Schmückle, R. Doerner, V. Krozer, N. Weimann // IEEE J. Microw. 2021. Vol. 1, № 1. P. 364–373. doi: 10.1109/JMW.2020.3032879

2. Heterogeneously Integrated RF Circuits Using Highly Scaled off-the-Shelf GaN HEMT Chiplets / F. Herrault, J. C. Wong, Y. Tang, H. Y. Tai, I. Ramos // IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2020. Vol. 30, № 11. P. 1061–1064. doi: 10.1109/LMWC.2020.3025126

3. III-V/III-N technologies for next generation high-capacity wireless communication / N. Collaert, A. Alian, A. Banerjee, G. Boccardi P. Cardinael et al. // Intern. Electron Devices Meeting (IEDM). San Francisco, USA, 03–07 Dec. 2022. IEEE, 2022. P. 11.5.1–11.5.4. doi: 10.1109/IEDM45625.2022.10019555
4. OMMIC D01PH технологический процесс. URL: <https://www.macom.com/european-semiconductor-center/mesc-processes> (дата обращения 24.08.2023)
5. High Performance and High Reliability of 0.1 μm InP HEMT MMIC Technology on 100 mm InP Substrates / R. Lai, Y. C. Chou, L. J. Lee, P. H. Liu, D. Leung, Q. Kan, X. Mei, C. H. Lin, D. Farkas, M. Barsky, D. Eng, A. Cavus, M. Lange, P. Chin, M. Wojtowicz, T. Block, A. Oki // IEEE 19th Intern. Conf. on Indium Phosphide & Related Materials, Matsue, Japan, 14–18 May 2007. IEEE, 2007. P. 63–66. doi: 10.1109/ICIPRM.2007.381123
6. 6W Ka Band Power Amplifier and 1.2dB NF X-Band Amplifier Using a 100nm GaN/Si Process / R. Leblanc, N. Santos Ibeas, A. Gasmi, F. Auvray, J. Poulain, F. Lecourt, G. Dagher, P. Frijlink // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp. (CSICS), Austin, TX, USA, 23–26 Oct. 2016. IEEE, 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/CSICS.2016.7751009
7. 0.13 μm SiGe BiCMOS Technology Fully Dedicated to mm-Wave Applications / G. Avenier, M. Diop, P. Chevalier, G. Troillard, N. Loubet et al. // IEEE J. of Solid-State Circuits. 2009. Vol. 44, № 9. P. 2312–2321. doi: 10.1109/JSSC.2009.2024102
8. A 0.13- μm SOI CMOS technology for low-power digital and RF applications / N. Zamdmer, A. Ray, J.-O. Plouchart, L. Wagner, N. Fong, K. A. Jenkins, W. Jin, P. Smeys, I. Yang, G. Shahidi, F. Assaderghi // Symp. on VLSI Technology. Digest of Technical Papers, Kyoto, Japan, 12–14 June 2001. IEEE, 2001. P. 85–86. doi: 10.1109/VLSIT.2001.934959
9. A Novel Si–GaN Monolithic Integration Technology for a High-Voltage Cascoded Diode / J. Ren, C. Liu, C. W. Tang, K. M. Lau, J. K. O. Sin // IEEE Electron Device Lett. 2017. Vol. 38, № 4. P. 501–504. doi: 10.1109/LED.2017.2665698
10. Pat. US 8823146B1. Semiconductor structure having silicon devices, column III-Nitride devices, and column III-non-Nitride or Column II-VI devices / W. E. Hoke. 02.09. 2014.
11. Kazior T. E. Beyond CMOS: heterogeneous integration of III–V devices, RF MEMS and other dissimilar materials/devices with Si CMOS to create intelligent microsystems // Phil. Trans. R. Soc. A. 2014. Vol. 372, № 2012. P. 20130105. doi: 10.1098/rsta.2013.0105
12. Silicon-on-insulator with hybrid orientations for heterogeneous integration of GaN on Si (100) substrate / R. Zhang, B. Zhao, K. Huang, T. You, Q. Jia, J. Lin, S. Zhang, Y. Yan, A. Yi, M. Zhou, X. Ou // AIP Advances. 2018. Vol. 8, № 5. P. 055323. doi: 10.1063/1.5030776
13. Kazior T. E., LaRoche J. R., Hoke W. E. More Than Moore: GaN HEMTs and Si CMOS Get It Together // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp. (CSICS), Monterey, CA, USA, 13–16 Oct. 2013. IEEE, 2013. P. 1–4. doi: 10.1109/CSICS.2013.6659239
14. Mendes J. C., Liehr M., Li C. Diamond/GaN HEMTs: Where from and Where to? // Materials. 2022. Vol. 15, № 2. P. 415. doi: 10.3390/ma15020415
15. Heteroepitaxial Growth of III-V Semiconductors on Silicon / J.-S. Park, M. Tang, S. Chen, H. Liu // Crystals. 2020. Vol. 10, iss. 12. P. 1163. doi: 10.3390/cryst10121163
16. A review of silicon-based wafer bonding processes, an approach to realize the monolithic integration of Si-CMOS and III–V-on-Si wafers / S. Bao, Y. Wang, K. Lina, L. Zhang, B. Wang, W. A. Sasangka, K. E. K. Lee, S. J. Chua, J. Michel, E. Fitzgerald, C. S. Tan, K. H. Lee // J. Semicond. 2021. Vol. 42, № 2. P. 023106. doi: 10.1088/1674-4926/42/2/023106
17. InAlN/GaN-on-Si HEMT with 4.5 W/mm in a 200-mm CMOS-Compatible MMIC Process for 3D Integration / S. Warnock, C.-L. Chen, J. Knechtel, R. Molnar et al. // IEEE/MTT-S Intern. Microwave Symp. (IMS). 2020. Los Angeles, CA, USA, 04–06 Aug. 2020. IEEE, 2020. P. 289–292. doi: 10.1109/IMS30576.2020.9224061
18. Si/InP Heterogeneous Integration Techniques from the Wafer-Scale (Hybrid Wafer Bonding) to the Discrete Transistor (Micro-Transfer Printing) / A. D. Carter, M. E. Urteaga, Z. M. Griffith, K.-J. Lee, J. Roderick, P. Rowell, J. Bergman, S. Hong, R. Patti, C. Petteway, G. Fountain, K. Ghosel, C. A. Bower // IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conf. (S3S), Burlingame, CA, USA, 15–18 Oct. 2018. IEEE, 2018. P. 1–4. doi: 10.1109/S3S.2018.8640196
19. LaRoche J. Towards a Si foundry-compatible GaN-on-Si MMIC process on 200 mm Si with Cu damascene BEOL (Conf. Presentation) // Proc. SPIE 11280, Gallium Nitride Materials and Devices XV, 112801G, 10 March 2020. doi: 10.1117/12.2543913
20. A Hetero-Integrated W-Band Transmitter Module in InP-on-BiCMOS Technology / M. Hossain, M. H. Eissa, M. Hrobak, D. Stoppel, N. Weimann, A. Malignaggi, A. Mai, D. Kissinger, W. Heinrich, V. Krozer // 13th European Microwave Integrated Circuits Conf. (EuMIC), Madrid, Spain, 23–25 Sept. 2018. IEEE, 2018. P. 97–100. doi: 10.23919/EuMIC.2018.8539915
21. Transfer print techniques for heterogeneous integration of photonic components / B. Corbett, R. Loi, W. Zhou, D. Liu, Z. Ma // Progress in Quantum Electronics. 2017. Vol. 52. P. 1–17. doi: 10.1016/j.pquantelec.2017.01.001
22. Gong Z. Layer-Scale and Chip-Scale Transfer Techniques for Functional Devices and Systems: A Review // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, iss. 4. Art. 842. P. 1–47. doi: 10.3390/nano11040842
23. Moutanabbir O., Gösele U. Heterogeneous Integration of Compound Semiconductors // Annual Review of Materials Research. 2010. Vol. 40, iss. 1. P. 469–500. doi: 10.1146/annurev-matsci-070909-104448

24. Lerner R., Hansen N. H. Commercial Sweet Spots for GaN and CMOS Integration by Micro-Transfer-Printing // ISPS'21 Proc. Prague, Czech Technical University. 2021. P. 99–106. doi: 10.14311/ISPS.2021.015
25. Micro-transfer Printing of GaN HEMTs for Heterogeneous Integration and Flexible RF Circuit Design / B. P. Downey, A. Xie, S. Mack, D. S. Katzer, J. G. Champlain, Yu Cao, N. Nepal, T. A. Growden, V. J. Gokhale, R. L. Coffie, M. T. Hardy, E. Beam, C. Lee, D. J. Meyer // Device Research Conf., Columbus, OH, USA, 21–24 June 2020. IEEE, 2020. P. 1–2. doi: 10.1109/DRC50226.2020.9135179
26. A compact and low-profile GaN power amplifier using interposer-based MMIC technology / D. Kim, J. M. Yook, S. J. An, S. R. Kim, J.-G. Yook, J. C. Kim // IEEE 16th Electronics Packaging Technology Conf., Singapore, 03–05 Dec. 2014. IEEE, 2014. P. 672–675. doi: 10.1109/EPTC.2014.7028416
27. Kompa G., Wasige E., Joodaki M. Quasi Monolithic Hybrid Technology Based on Si Micromachining and Low-Temperature Thin-Film Processing // World Micro-technologies Congress of MICROTEC. 2000. Sep. P. 109–114.
28. Metal-Embedded Chiplet Assembly for Microwave Integrated Circuits / F. Herrault, J. C. Wong, D. Regan, D. F. Brown, H. Fung, Y. Tang, H. Sharifi // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2020. Vol. 10, № 9. P. 1579–1582. doi: 10.1109/TCPMT.2020.3012505
29. Si-Embedded IC Package for W-band Applications: Interconnection Analysis / H.-B. Lee, B.-W. Min, Y.-G. Kim, J. M. Yook, S. Kim, W. Kim // IEEE Asia-Pacific Microwave Conf., Singapore, 10–13 Dec. 2019. IEEE, 2019. P. 1080–1082. doi: 10.1109/APMC46564.2019.9038484
30. Metal-Embedded Chip Assembly Processing for Enhanced RF Circuit Performance / A. Estrada, G. Lasser, M. Pinto, F. Herrault, Z. Popović // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019. Vol. 67, № 9. P. 3537–3546. doi: 10.1109/TMTT.2019.2931010
31. Monolithically Integrated Self-Biased Circulator for mmWave T/R MMIC Applications / Y. Cui, H.-Y. Chen, S. Chen, D. Linkhart, H. Tan et al. // IEEE Intern. Electron Devices Meeting. 2021. P. 4.2.1–4.2.4. doi: 10.1109/IEDM19574.2021.9720611
32. Additively Manufactured mm-Wave Multichip Modules with Fully Printed ‘Smart’ Encapsulation Structures / X. He, B. K. Tehrani, R. Bahr, W. Su, M. M. Tentzeris // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 2020. Vol. 68, № 7. P. 2716–2724. doi: 10.1109/TMTT.2019.2956934
33. Additive Manufacturing of a W-Band System-on-Package / M. T. Craton, X. Konstantinou, J. D. Albrecht, P. Chahal, J. Papapolymerou // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2021. Vol. 69, № 9. P. 4191–4198. doi: 10.1109/TMTT.2021.3076066
34. Cung G., Spence T., Borodulin P. Enabling broadband, highly integrated phased array radiating elements through additive manufacturing // IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology, Waltham, MA, USA, 18–21 Oct. 2016. IEEE, 2016. P. 1–9. doi: 10.1109/ARRAY.2016.7832632
35. Koliass N. J., Borkowski M. T. The development of T/R modules for radar applications // IEEE/MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest, Montreal, QC, Canada, 17–22 June 2012. IEEE, 2012. P. 1–3. doi: 10.1109/MWSYM.2012.6259727
36. A Low-Cost 30-W Class X-Band GaN-on-Si MMIC Power Amplifier with a GaAs MMIC Output Matching Circuit / J. Kamioka, Y. Kawamura, Y. Tarui, K. Nakahara, Y. Kamo, H. Okazaki, M. Hangai, K. Yamanaka, H. Fukumoto // 13th European Microwave Integrated Circuits Conf., Madrid, Spain, 23–25 Sep. 2018. IEEE, 2018. P. 93–96. doi: 10.23919/EuMIC.2018.8539903
37. Interconnects Analyses in Quasi-Monolithic Integration Technology / M. Joodaki, A. Kricke, H. Hillmer, G. Kompa // IEEE Electrical Performance of Electronic Packaging, Scottsdale, AZ, USA, 23–25 Oct. 2006. IEEE, 2006. P. 229–232. doi: 10.1109/EPEP.2006.321236
38. A Cost-Effective Flip-Chip Interconnection for Applications from DC until 200 GHz / P. V. Testa, H. Morath, P. Goran, C. Carta, F. Ellinger // IEEE Asia-Pacific Conf. on Applied Electromagnetics, Melacca, Malaysia, 25–27 Nov. 2019. IEEE, 2019. P. 1–6. doi: 10.1109/APACE47377.2019.9021003
39. Design considerations for a new generation of SiPMs with unprecedented timing resolution / S. Enoch, A. Gola, P. Lecoq, A. Rivetti // J. Inst. 2021. Vol. 16, № 02. P. P02019–P02019. doi: 10.1088/1748-0221/16/02/P02019
40. Generational changes of flip chip interconnection technology / W. S. Tsai, C. Y. Huang, C. K. Chung, K. H. Yu, C. F. Lin // 12th Intern. Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conf. (IMPACT), Taipei, Taiwan, 25–27 Oct. 2017. IEEE, 2017. P. 306–310. doi: 10.1109/IMPACT.2017.8255955
41. Path to 3D heterogeneous integration / D. S. Green, C. L. Dohrman, J. Demmin, T.-H. Chang // Intern. 3D Systems Integration Conf. (3DIC), Sendai, Japan, 31 Aug.–02 Sep. 2015. IEEE, 2015. P. FS7.1–FS7.3. doi: 10.1109/3DIC.2015.7334469
42. Wafer-level Au–Au bonding in the 350–450 °C temperature range / H. R. Tofteberg, K. Schjølberg-Henriksen, E. J. Fasting, A. S. Moen, M. M. V. Taklo, E. U. Poppe, C. J. Simensen // J. of Micromechanics and Microengineering. 2014. Vol. 24, iss. 8. P. 084002. doi: 10.1088/0960-1317/24/8/084002
43. Recent progress in SLID bonding in novel 3D-IC technologies / L. Sun, M.-H. Chen, L. Zhang, P. He, L.-S. Xie // J. of Alloys and Compounds. 2020. Vol. 818. Art. 152825. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.152825
44. Technology for the Heterointegration of InP DHBT Chiplets on a SiGe BiCMOS Chip for mm-wave

MMICs / M. Rausch, T. Flisgen, C. Stollmacker, A. Stranz, A. Thies, R. Doerner, H. Yacoub, W. Heinrich // 52nd European Microwave Conf. (EuMC), Milan, Italy, 27–29 Sep. 2022. IEEE, 2022. P. 28–31. doi: 10.23919/EuMC54642.2022.9924451

45. Flip-Chip Integration of III-V Chips on Wafer for mmW Applications / A. S. Efimov, A. A. Zaycev, A. S. Kurochka, A. M. Temnov, K. V. Dudinov, A. M. Emelianov, D. D. Korolkova, A. D. Rudina, Y. S. Ranzhin // IEEE 8th All-Russ. Microwave Conf. (RMC), Moscow, Russia, 23–25 Nov. 2022. IEEE, 2022. P. 220–222. doi: 10.1109/RMC55984.2022.10079408

46. Li C.-H., Hsieh W.-T., Chiu T.-Y. A Flip-Chip-Assembled W-Band Receiver in 90-nm CMOS and IPD Technologies // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019. Vol. 67, № 4. P. 1628–1639. doi: 10.1109/TMTT.2019.2894426

47. Encapsulated Organic Package Technology for Wideband Integration of Heterogeneous MMICs / S. Pavlidis, G. Alexopoulos, A. Ç. Ulusoy, M. Cho, J. Papapolymerou // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2017. Vol. 65, № 2. P. 438–448. doi: 10.1109/TMTT.2016.2630067

48. Heinrich W. The flip-chip approach for millimeter wave packaging // IEEE Microwave Magazine. 2005. Vol. 6, № 3. P. 36–45. doi: 10.1109/MMW.2005.1511912

49. Fan-out Wafer Level Packaging of GaN Traveling Wafer Amplifier / D. Schwantuschke, E. Ture, T. Braun, T. D. Nguyen, M. Wohrmann, M. Pretl, S. Engels // IEEE/MTT-S Intern. Microwave Symp. - IMS 2022, Denver, CO, USA, 19–24 June 2022. IEEE, 2022. P. 579–582. doi: 10.1109/IMS37962.2022.9865579

50. Fegghi R., Joodaki M. Thermal analysis of microwave GaN-HEMTs in conventional and flip-chip

assemblies // Intern. J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2018. Vol. 28, iss. 8. Art. e21513. doi: 10.1002/mmce.21513

51. A Millimeter-Wave System-on-Package Technology Using a Thin-Film Substrate With a Flip-Chip Interconnection / S. Song, Y. Kim, J. Maeng, H. Lee, Y. Kwon, K.-S. Seo // IEEE Transactions on Advanced Packaging. 2009. Vol. 32, no. 1. P. 101–108. doi: 10.1109/TADVP.2008.2006626

52. Transceiver MMIC's for street surveillance radar / K. Tsukashima, O. Anegawa, T. Kawasaki, A. Otsuka, M. Kubota, T. Tokumitsu, S. Ogita // 11th European Microwave Integrated Circuits Conf. (EuMIC), London, UK, 03–04 Oct. 2016. IEEE, 2016. P. 329–332. doi: 10.1109/EuMIC.2016.7777557

53. DBIT-direct backside interconnect technology: a manufacturable, bond wire free interconnect technology for microwave and millimeter wave MMICs / T. E. Kazior, H. N. Atkins, A. Fatemi, Y. Chen, F. Y. Colomb, J. P. Wendler // IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp., Digest. Denver, CO, USA, 08–13 June 1997. IEEE, 1997. P. 723–726. doi: 10.1109/MWSYM.1997.602892

54. A Hot-via Chip-to-substrate Interconnect for Ultra-compact System Package Application up to W Band / J. Yang, B. Zou, J. Xu, J. Zhou // PIER Let. 2022. Vol. 107. P. 75–81. doi: 10.2528/PIERL22020201

55. Millimetre-wave Hot-Via interconnect-based GaAs chip-set for automotive RADAR and security sensors / P. F. Alleaume, C. Toussain, C. Auvinet, D. Domnesque, P. Quentin, M. Camiade // European Microwave Integrated Circuit Conf., Amsterdam, Netherlands, 27–28 Oct. 2008. IEEE, 2008. P. 52–55. doi: 10.1109/EMICC.2008.4772226

Информация об авторе

Ефимов Александр Сергеевич – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (Рязанский государственный радиотехнический университет, 2017), инженер 2-й категории АО «НПП "Исток" им. Шокина». Автор более 15 научных работ. Сфера научных интересов – широкозонные полупроводники; усилители мощности и малошумящие усилители СВЧ; интеграция микроэлектроники СВЧ. Адрес: АО «НПП "Исток" им. Шокина», ул. Вокзальная, д. 2а, Фрязино, 141190, Россия
E-mail: easmov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6792-1096>

References

1. Heinrich W., Hossain M., Sinha S., Schmückle F.-J., Doerner R., Krozer V., Weimann N. Connecting Chips with More Than 100 GHz Bandwidth. IEEE J. Microw. 2021, vol. 1, no. 1, pp. 364–373. doi: 10.1109/JMW.2020.3032879

2. Herrault F., Wong J. C., Tang Y., Tai H. Y., Ramos I. Heterogeneously Integrated RF Circuits Using Highly Scaled off-the-Shelf GaN HEMT Chiplets. IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2020, vol. 30, no. 11, pp. 1061–1064. doi: 10.1109/LMWC.2020.3025126

3. Collaert N., Alian A., Banerjee A., Boccardi G., Cardinael P. et al. III-V/III-N Technologies for Next

Generation High-Capacity Wireless Communication. 2022 Intern. Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, USA, 03–07 Dec. 2022. IEEE, 2022, pp. 11.5.1–11.5.4. doi: 10.1109/IEDM45625.2022.10019555

4. OMMIC D01PH Technological Process. Available at: <https://www.macom.com/european-semiconductor-center/mesc-processes> (accessed 24.08.2023)

5. Lai R., Chou Y. C., Lee L. J., Liu P. H., Leung D., Kan Q., Mei X., Lin C. H., Farkas D., Barsky M., Eng D., Cavus A., Lange M., Chin P., Wojtowicz M., Block T., Oki A. High Performance and High Reliability of 0.1µm InP HEMT MMIC Technol-

ogy on 100 mm InP Substrates. IEEE 19th Intern. Conf. on Indium Phosphide & Related Materials, Matsue, Japan, 14–18 May 2007. IEEE, 2007, pp. 63–66. doi: 10.1109/ICIPRM.2007.381123

6. Leblanc R., Santos Ibeas N., Gasmi A., Auvray F., Poulain J., Lecourt F., Dagher G., Frijlink P. 6W Ka Band Power Amplifier and 1.2dB NF X-Band Amplifier Using a 100nm GaN/Si Process. 2016 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp. (CSICS), Austin, TX, USA, 23–26 Oct. 2016. IEEE, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/CSICS.2016.7751009

7. Avenier G., Diop M., Chevalier P., Troillard G., Loubet N. et al. 0.13 μ m SiGe BiCMOS Technology Fully Dedicated to mm-Wave Applications. IEEE J. of Solid-State Circuits. 2009, vol. 44, no. 9, pp. 2312–2321. doi: 10.1109/JSSC.2009.2024102

8. Zamdmer N., Ray A., Plouchart J.-O., Wagner L., Fong N., Jenkins K. A., Jin W., Smeys P., Yang I., Shahidi G., Assaderghi F. A 0.13- μ m SOI CMOS Technology for Low-Power Digital and RF Applications. 2001 Symp. on VLSI Technology. Digest of Technical Papers, Kyoto, Japan, 12–14 June 2001. IEEE, 2001, pp. 85–86. doi: 10.1109/VLSIT.2001.934959

9. Ren J., Liu C., Tang C. W., Lau K. M., Sin J. K. O. A Novel Si–GaN Monolithic Integration Technology for a High-Voltage Cascoded Diode. IEEE Electron Device Lett. 2017, vol. 38, no. 4, pp. 501–504. doi: 10.1109/LED.2017.2665698

10. Hoke W. E. Semiconductor Structure Having Silicon Devices, Column III-Nitride Devices, and Column III-non-Nitride or Column II-VI devices. Pat. US 8823146B1. 02.09. 2014.

11. Kazior T. E. Beyond CMOS: Heterogeneous Integration of III–V Devices, RF MEMS and Other Dissimilar Materials/Devices with Si CMOS to Create Intelligent Microsystems. Phil. Trans. R. Soc. A. 2014, vol. 372, no. 2012, p. 20130105. doi: 10.1098/rsta.2013.0105

12. Zhang R., Zhao B., Huang K., You T., Jia Q., Lin J., Zhang S., Yan Y., Yi A., Zhou M., Ou X. Silicon-on-insulator with Hybrid Orientations for Heterogeneous Integration of GaN on Si (100) Substrate. AIP Advances. 2018, vol. 8, no. 5, p. 055323. doi: 10.1063/1.5030776

13. Kazior T. E., LaRoche J. R., Hoke W. E. More Than Moore: GaN HEMTs and Si CMOS Get It Together. 2013 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp. (CSICS), Monterey, CA, USA, 13–16 Oct. 2013. IEEE, 2013, pp. 1–4. doi: 10.1109/CSICS.2013.6659239

14. Mendes J. C., Liehr M., Li C. Diamond/GaN HEMTs: Where from and Where to? Materials. 2022, vol. 15, no. 2, p. 415. doi: 10.3390/ma15020415

15. Park J.-S., Tang M., Chen S., Liu H. Heteroepitaxial Growth of III-V Semiconductors on Silicon. Crystals. 2020, vol. 10, iss. 12, p. 1163. doi: 10.3390/cryst10121163

16. Bao S., Wang Y., Lina K., Zhang L., Wang B., Sasangka W. A., Lee K. E. K., Chua S. J., Michel J., Fitzgerald E., Tan C. S., Lee K. H. A Review of Silicon-Based Wafer Bonding Processes, an Approach to

Realize the Monolithic Integration of Si-CMOS and III–V-on-Si wafers. J. Semicond. 2021, vol. 42, no. 2, p. 023106. doi: 10.1088/1674-4926/42/2/023106

17. Warnock S., Chen C.-L., Knechtl J., Molnar R. et al. InAlN/GaN-on-Si HEMT with 4.5 W/mm in a 200-mm CMOS-Compatible MMIC Process for 3D Integration. IEEE/MTT-S Intern. Microwave Symp. (IMS). 2020, Los Angeles, CA, USA, 04–06 Aug. 2020. IEEE, 2020, pp. 289–292. doi: 10.1109/IMS30576.2020.9224061

18. Carter A. D., Urteaga M. E., Griffith Z. M., Lee K.-J., Roderick J., Rowell P., Bergman J., Hong S., Patti R., Petteway C., Fountain G., Ghosel K., Bowler C. A. Si/InP Heterogeneous Integration Techniques from the Wafer-Scale (Hybrid Wafer Bonding) to the Discrete Transistor (Micro-Transfer Printing). 2018 IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conf. (S3S), Burlingame, CA, USA, 15–18 Oct. 2018. IEEE, 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/S3S.2018.8640196

19. LaRoche J. Towards a Si Foundry-Compatible GaN-on-Si MMIC Process on 200 mm Si with Cu Damascene BEOL (Conf. Presentation). Proc. SPIE 11280, Gallium Nitride Materials and Devices XV, 112801G. 10 March 2020. doi: 10.1117/12.2543913

20. Hossain M., Eissa M. H., Hrobak M., Stoppel D., Weimann N., Malignaggi A., Mai A., Kissinger D., Heinrich W., Krozer V. A Hetero-Integrated W-Band Transmitter Module in InP-on-BiCMOS Technology. 13th European Microwave Integrated Circuits Conf. (EuMIC), Madrid, Spain, 23–25 Sep. 2018. IEEE, 2018, pp. 97–100. doi: 10.23919/EuMIC.2018.8539915

21. Corbett B., Loi R., Zhou W., Liu D., Ma Z. Transfer Print Techniques for Heterogeneous Integration of Photonic Components. Progress in Quantum Electronics. 2017, vol. 52, pp. 1–17. doi: 10.1016/j.pquantelec.2017.01.001

22. Gong Z. Layer-Scale and Chip-Scale Transfer Techniques for Functional Devices and Systems: A Review. Nanomaterials. 2021, vol. 11, iss. 4, art. 842, pp. 1–47. doi: 10.3390/nano11040842

23. Moutanabbir O., Gösele U. Heterogeneous Integration of Compound Semiconductors. Annual Review of Materials Research. 2010, vol. 40, iss. 1, pp. 469–500. doi: 10.1146/annurev-matsci-070909-104448

24. Lerner R., Hansen N. H. Commercial Sweet Spots for GaN and CMOS Integration by Micro-Transfer-Printing. ISPS'21 Proc. Prague, Czech Technical University. 2021, pp. 99–106. doi: 10.14311/ISPS.2021.015

25. Downey B. P., Xie A., Mack S., Kutzer D. S., Champlain J. G., Cao Yu, Nepal N., Growden T. A., Gokhale V. J., Coffie R. L., Hardy M. T., Beam E., Lee C., Meyer D. J. Micro-transfer Printing of GaN HEMTs for Heterogeneous Integration and Flexible RF Circuit Design. Device Research Conf., Columbus, OH, USA, 21–24 June 2020. IEEE, 2020, pp. 1–2. doi: 10.1109/DRC50226.2020.9135179

26. Kim D., Yook J. M., An S. J., Kim S. R., Yook J.-G., Kim J. C. A Compact and Low-Profile GaN Power

Amplifier Using Interposer-Based MMIC Technology. IEEE 16th Electronics Packaging Technology Conf., Singapore. 03–05 Dec. 2014. IEEE, 2014, pp. 672–675. doi: 10.1109/EPTC.2014.7028416

27. Kompa G., Wasige E., Joodaki M. Quasi Monolithic Hybrid Technology Based on Si Micromachining and Low-Temperature Thin-Film Processing. World Micro-technologies Congress of MICROTEC. 2000. Sep. 2000, pp. 109–114.

28. Herrault F., Wong J. C., Regan D., Brown D. F., Fung H., Tang Y., Sharifi H. Metal-Embedded Chiplet Assembly for Microwave Integrated Circuits. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2020, vol. 10, no. 9, pp. 1579–1582. doi: 10.1109/TCPMT.2020.3012505

29. Lee H.-B., Min B.-W., Kim Y.-G., Yook J. M., Kim S., Kim W. Si-Embedded IC Package for W-band Applications: Interconnection Analysis. 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conf., Singapore, 10–13 Dec. 2019. IEEE, 2019, pp. 1080–1082. doi: 10.1109/APMC46564.2019.9038484

30. Estrada A., Lasser G., Pinto M., Herrault F., Popović Z. Metal-Embedded Chip Assembly Processing for Enhanced RF Circuit Performance. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019, vol. 67, no. 9, pp. 3537–3546. doi: 10.1109/TMTT.2019.2931010

31. Cui Y., Chen H.-Y., Chen S. et al. Monolithically Integrated Self-Biased Circulator for mmWave T/R MMIC Applications. 2021 IEEE Intern. Electron Devices Meeting. 2021, pp. 4.2.1–4.2.4. doi: 10.1109/IEDM19574.2021.9720611

32. He X., Tehrani B. K., Bahr R., Su W., Tentzeris M. M. Additively Manufactured mm-Wave Multichip Modules with Fully Printed ‘Smart’ Encapsulation Structures. IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 2020, vol. 68, no. 7, pp. 2716–2724. doi: 10.1109/TMTT.2019.2956934

33. Craton M. T., Konstantinou X., Albrecht J. D., Chahal P., Papapolymerou J. Additive Manufacturing of a W-Band System-on-Package. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2021, vol. 69, no. 9, pp. 4191–4198. doi: 10.1109/TMTT.2021.3076066

34. Cung G., Spence T., Borodulin P. Enabling Broadband, Highly Integrated Phased Array Radiating Elements Through Additive Manufacturing. IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology, Waltham, MA, USA, 18–21 Oct. 2016. IEEE, 2016, pp. 1–9. doi: 10.1109/ARRAY.2016.7832632

35. Koliass N. J., Borkowski M. T. The Development of T/R Modules for Radar Applications. IEEE/MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest, Montreal, QC, Canada, 17–22 June 2012. IEEE, 2012, pp. 1–3. doi: 10.1109/MWSYM.2012.6259727

36. Kamioka J., Kawamura Y., Tarui Y., Nakahara K., Kamo Y., Okazaki H., Hangai M., Yamanaka K., Fukumoto H. A Low-Cost 30-W Class X-Band GaN-on-Si MMIC Power Amplifier with a GaAs MMIC Output Matching Circuit. 13th European Microwave

Integrated Circuits Conf., Madrid, Spain, 23–25 Sep. 2018. IEEE, 2018, pp. 93–96. doi: 10.23919/EuMIC.2018.8539903

37. Joodaki M., Kricke A., Hillmer H., Kompa G. Interconnects Analyses in Quasi-Monolithic Integration Technology. IEEE Electrical Performance of Electronic Packaging, Scottsdale, AZ, USA, 23–25 Oct. 2006. IEEE, 2006, pp. 229–232. doi: 10.1109/EPEP.2006.321236

38. Testa P. V., Morath H., Goran P., Carta C., Ellinger F. A Cost-Effective Flip-Chip Interconnection for Applications from DC until 200 GHz. 2019 IEEE Asia-Pacific Conf. on Applied Electromagnetics, Melacca, Malaysia, 25–27 Nov. 2019. IEEE, 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/APACE47377.2019.9021003

39. Enoch S., Gola A., Lecoq P., Rivetti A. Design Considerations for a New Generation of Sipms with Unprecedented Timing Resolution. J. Inst. 2021, vol. 16, no. 02, pp. P02019–P02019. doi: 10.1088/1748-0221/16/02/P02019

40. Tsai W. S., Huang C. Y., Chung C. K., Yu K. H., Lin C. F. Generational Changes of Flip Chip Interconnection Technology. 12th Intern. Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conf. (IMPACT), Taipei, Taiwan, 25–27 Oct. 2017. IEEE, 2017, pp. 306–310. doi: 10.1109/IMPACT.2017.8255955

41. Green D. S., Dohrman C. L., Demmin J., Chang T.-H. Path to 3D Heterogeneous Integration. Intern. 3D Systems Integration Conf. (3DIC), Sendai, Japan, 31 Aug.–02 Sep. 2015. IEEE, 2015, pp. FS7.1–FS7.3. doi: 10.1109/3DIC.2015.7334469

42. Tofteberg H. R., Schjølberg-Henriksen K., Fastling E. J., Moen A. S., Taklo M. M. V., Poppe E. U., Simensen C. J. Wafer-level Au–Au Bonding in the 350–450 °C Temperature Range. J. of Micromechanics and Microengineering. 2014, vol. 24, iss. 8, p. 084002. doi: 10.1088/0960-1317/24/8/084002

43. Sun L., Chen M.-H., Zhang L., He P., Xie L.-S. Recent Progress in SLID Bonding in Novel 3D-IC Technologies. J. of Alloys and Compounds. 2020, vol. 818, art. 152825. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.152825

44. Rausch M., Flisgen T., Stolmacker C., Stranz A., Thies A., Doerner R., Yacoub H., Heinrich W. Technology for the Heterointegration of InP DHBT Chiplets on a SiGe BiCMOS Chip for mm-wave MMICs. 52nd European Microwave Conf. (EuMC), Milan, Italy, 27–29 Sep. 2022. IEEE, 2022, pp. 28–31. doi: 10.23919/EuMC54642.2022.9924451

45. Efimov A. S., Zaycev A. A., Kurochka A. S., Temnov A. M., Dudinov K. V., Emelianov A. M., Korolkova D. D., Rudina A. D., Ranzhin Y. S. Flip-Chip Integration of III-V Chips on Wafer for mmW Applications. IEEE 8th All-Russ. Microwave Conf. (RMC), Moscow, Russia, 23–25 Nov. 2022. IEEE, 2022, pp. 220–222. doi: 10.1109/RMC55984.2022.10079408

46. Li C.-H., Hsieh W.-T., Chiu T.-Y. A Flip-Chip Assembled W-Band Receiver in 90-nm CMOS and IPD Technologies. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019, vol. 67, no. 4, pp. 1628–1639. doi: 10.1109/TMTT.2019.2894426

47. Pavlidis S., Alexopoulos G., Ulusoy A. Ç., Cho M., Papapolymerou J. Encapsulated Organic Package Technology for Wideband Integration of Heterogeneous MMICs. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017, vol. 65, no. 2, pp. 438–448. doi: 10.1109/TMTT.2016.2630067
48. Heinrich W. The Flip-Chip Approach for Millimeter Wave Packaging. *IEEE Microwave Magazine*. 2005, vol. 6, no. 3, pp. 36–45. doi: 10.1109/MMW.2005.1511912
49. Schwantuschke D., Ture E., Braun T., Nguyen T. D., Wohrmann M., Pretl M., Engels S. Fan-out Wafer Level Packaging of GaN Traveling Wafer Amplifier. 2022 IEEE/MTT-S Intern. Microwave Symp. - IMS 2022, Denver, CO, USA, 19–24 June 2022. IEEE, 2022, pp. 579–582. doi: 10.1109/IMS37962.2022.9865579
50. Fegghi R., Joodaki M. Thermal Analysis of Microwave GaN-HEMTs in Conventional and Flip-Chip Assemblies. *Intern. J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2018, vol. 28, iss. 8, art. e21513. doi: 10.1002/mmce.21513
51. Song S., Kim Y., Maeng J., Lee H., Kwon Y., Seo K.-S. A Millimeter-Wave System-on-Package Technology Using a Thin-Film Substrate With a Flip-Chip Interconnection. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*. 2009, vol. 32, no. 1, pp. 101–108. doi: 10.1109/TADVP.2008.2006626
52. Tsukashima K., Anegawa O., Kawasaki T., Otsuka A., Kubota M., Tokumitsu T., Ogita S. Transceiver MMIC's for Street Surveillance Radar. 11th European Microwave Integrated Circuits Conf. (EuMIC), London, UK, 03–04 Oct. 2016. IEEE, 2016, pp. 329–332. doi: 10.1109/EuMIC.2016.7777557
53. Kazior T. E., Atkins H. N., Fatemi A., Chen Y., Colomb F. Y., Wendler J. P. DBIT-Direct Backside Interconnect Technology: a Manufacturable, Bond Wire Free Interconnect Technology for Microwave and Millimeter Wave MMICs. 1997 IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest, Denver, CO, USA, 08–13 June 1997. IEEE, 1997, pp. 723–726. doi: 10.1109/MWSYM.1997.602892
54. Yang J., Zou B., Xu J., Zhou J. A Hot-via Chip-to-substrate Interconnect for Ultra-compact System Package Application up to W Band. *PIER Let.* 2022, vol. 107, pp. 75–81. doi: 10.2528/PIERL22020201
55. Alleaume PF., Toussain C., Auvinet C., Domnesque D., Quentin P., Camiade M. Millimetre-Wave Hot-Via Interconnect-Based GaAs Chip-Set for Automotive RADAR and Security Sensors. 2008 European Microwave Integrated Circuit Conf., Amsterdam, Netherlands, 27–28 Oct. 2008. IEEE, 2008, pp. 52–55. doi: 10.1109/EMICC.2008.4772226

Information about the author

Alexander S. Efimov, Master's Degree in electronics and nanoelectronics (Ryazan State Radioengineering University, 2017), Engineer at JSC RPC «"Istok" named after Shokin». The author of more than 15 scientific publications. Area of expertise: wide band gap semiconductors; millimeter-wave power amplifiers and low-noise amplifiers; heterogeneous integration in mm-wave application.
Address: JSC RPC «"Istok" named after Shokin», 2A, Vokzalnaya st., Fryazino 141190, Russia
E-mail: easmov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6792-1096>

Разработка системы экологического мониторинга на базе технологий пространственной разметки и машинного зрения

М. М. Заславский, К. Е. Крыжановский, Д. В. Иванов ✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ dmitry.ivanov@moevm.info

Аннотация

Введение. Использование доступных спутниковых снимков и аэрофотосъемки беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) в задачах экологического мониторинга наталкивается на несовершенство существующих инструментов. Геоинформационные системы не обладают достаточной гибкостью для автоматической работы с гетерогенными источниками, а новейшие модели искусственного интеллекта в экологии требуют предварительной подготовки данных. В статье представлены результаты проектирования программной системы экологического мониторинга по данным сенсоров машинного зрения, которая обеспечивает унификацию данных и одновременно является гибкой как с точки зрения источников данных, так и способов их анализа.

Цель работы. Создание открытой программной системы для согласованной пространственной разметки гетерогенных данных машинного зрения для задач экологического мониторинга.

Материалы и методы. Методы программной инженерии, методы теории баз данных, методы пространственной разметки, методы обработки изображений.

Результаты. На основе анализа особенностей существующих открытых данных дистанционного зондирования Земли, а также аэрофотосъемки БПЛА и подходов к проведению экологического мониторинга составлен обобщенный метод унификации данных. Для реализации метода была составлена гибкая архитектура программной системы, а также разработана модель данных для документоориентированной системы управления базами данных, позволяющие хранить данные и масштабировать процедуру анализа данных.

Заключение. В статье проведен анализ существующих источников данных и инструментов проведения экологического мониторинга. Создан обобщенный метод унификации данных машинного зрения, архитектура и модель данных. Метод, архитектура и модель успешно реализованы в виде программной системы с веб-интерфейсом.

Ключевые слова: пространственная разметка, машинное зрение, дистанционное зондирование Земли, аэрофотосъемка, автоматизация экологического мониторинга

Для цитирования: Заславский М. М., Крыжановский К. Е., Иванов Д. В. Разработка системы экологического мониторинга на базе технологий пространственной разметки и машинного зрения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 56–69. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-56-69

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-76-10042).

Благодарности. Выражаем признательность студентам кафедры МОЭВМ СПбГЭТУ "ЛЭТИ" Павлу Романовичу Талашенко, Вячеславу Витальевичу Парамонову, Михаилу Денисовичу Давыдову, Владиславу Олеговичу Болкунову, Дмитрию Вадимовичу Сергеевину, Никите Андреевичу Бояркину за участие в совместных исследованиях.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.04.2023; принята к публикации после рецензирования 10.07.2023; опубликована онлайн 28.09.2023

Development of an Environmental Monitoring System Based on Spatial Marking and Machine Vision Technologies

Mark M. Zaslavskiy, Kirill E. Kryzhanovskiy, Dmitry V. Ivanov ✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ dmitry.ivanov@moevm.info

Abstract

Introduction. The use of available satellite images and aerial photography by unmanned aerial vehicles (UAVs) in the tasks of environmental monitoring is challenged by the imperfection of existing tools. Geographic information systems are characterized by insufficient flexibility to automatically work with heterogeneous sources. The latest models based on artificial intelligence in ecology require preliminary data preparation. The article presents the results of designing a software system for environmental monitoring based on machine vision sensor data, which provides data unification while being flexible both in terms of data sources and methods of their analysis.

Aim. Creation of a generalized software system for coordinated spatial marking of heterogeneous machine vision data for environmental monitoring tasks.

Materials and methods. Software engineering methods, database theory methods, spatial markup methods, image processing methods.

Results. A generalized method for unifying data was developed. The method is based on the analysis of existing open data from remote sensing of the Earth, as well as UAV aerial photography and approaches to environmental monitoring. To implement the method, a flexible architecture of the software system was designed, and a data model for a document-oriented DBMS was developed, which allows storing data and scaling the data analysis procedure.

Conclusion. The existing sources of data and tools for environmental monitoring were analyzed. A generalized method for unifying machine vision data, an architecture, and a data model was created. The method, architecture, and model were successfully implemented as a software system with a web interface.

Keywords: spatial marking, machine vision, remote sensing of the Earth, aerial photography, automation of environmental monitoring

For citation: Zaslavskiy M. M., Kryzhanovskiy K. E., Ivanov D. V. Development of an Environmental Monitoring System Based on Spatial Marking and Machine Vision Technologies. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 56–69. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-56-69

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (grant no. 22-76-10042).

We would like to express our gratitude to the students of the Department of Software Engineering and Computer Applications SPbETU "LETI" Pavel R. Talashchenko, Vyacheslav V. Paramonov, Mikhail D. Davydov, Vladislav O. Bolkunov, Dmitry V. Sergevnin, Nikita A. Boyarkin for participation in joint research.

Submitted 16.04.2023; accepted 10.07.2023; published online 28.09.2023

Введение. На сегодняшний день существует большое количество территорий, страдающих от таких экологических проблем, как изменение климата, загрязнение окружающей среды, рост пустынь и сокращение площадей лесных массивов. При этом негативные эффекты напрямую воздействуют на экономику затронутых стран: так, в [1–3] отмечается негативное влияние последствий изменения клима-

та на сельское хозяйство, сферу энергетики и городскую инфраструктуру. Ввиду сложности экологических проблем для устранения и минимизации последствий требуется постоянный мониторинг обширных природных зон. Существующие на данный момент технологии позволяют значительно упростить и автоматизировать процесс сбора данных: беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [4] и спутники [5] на

сегодняшний день стали наиболее распространенным инструментом решения экологических задач. Однако вопросы агрегирования и совместной обработки данных экологического мониторинга не решаются достаточно эффективно. Несмотря на то что в последние пять лет произошло значительное развитие приложений методов машинного обучения и искусственного интеллекта (ИИ) [6] для экологических задач, на уровне инструментов существуют сложности в согласовании применения различных методик анализа при использовании данных из разных источников. Исследователи применяют либо устоявшуюся технологию геоинформационных систем [7], которая воплощает достаточно подробную модель данных максимально общего назначения и подразумевает ориентацию на сами данные вместо способов их обработки, либо используют прототипы новейших методов в качестве самостоятельных программных пакетов. Возникает необходимость переосмысления архитектуры обработки данных для задач экологического мониторинга для организации процесса с точки зрения унификации источников данных и методов обработки.

Целью данной работы является создание открытой программной системы для согласованной пространственной разметки гетерогенных данных машинного зрения для задач экологического мониторинга. В качестве возможных источников входных данных выступают RGB-снимки земной поверхности, выполненные с помощью спутников дистанционного зондирования земли и БПЛА. Обработка данных организуется с помощью конвейерного принципа, включающего этапы предобработки данных и применения методов экологического анализа. Унификация результатов достигается путем обеспечения единых интерфейсов доступа к гетерогенным данным, а также за счет единого интерфейса для подключения дополнительных методов анализа данных.

Текст статьи организован следующим образом. В разделе "Обзор" даются характеристики исходных данных экологического мониторинга в открытом доступе, а также проводится сравнение основных подходов к анализу данных. В разделе "Архитектура системы" подробно опи-

сывается метод обработки, модель данных и принцип построения программной системы. В разделе "Реализация системы" приводятся основные технические решения и используемые технологии, описываются характеристики разработанной системы.

Обзор. Для построения обобщенной программной системы экологического мониторинга на основе RGB-снимков земной поверхности необходимо проанализировать особенности источников данных, а также недостатки существующих программных средств экологического мониторинга.

Учитывая важность современных экологических проблем, необходимо, чтобы разрабатываемая программная система была доступна для как можно большего количества потенциальных пользователей. Поэтому в ее архитектуре необходимо предусмотреть использование открытых источников данных и свободно распространяемых технологий. Наиболее доступными и полезными в задачах мониторинга выступают системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [8], поскольку современные спутники покрывают всю поверхность планеты, обеспечивая при этом высокую детализацию изображений и большой диапазон применяемых инструментов наблюдения.

Для анализа особенностей спутниковых данных был проведен поиск активных спутниковых систем, данные которых публикуются в открытом доступе и обновляются на регулярной основе. Поиск проводился по запросам "satellite remote sensing", "спутники дистанционного зондирования Земли". Результаты поиска фильтровались по наличию RGB-данных и режиму доступа к спутниковым данным (открытый). При отсеивании нерелевантных результатов был сформирован список из 11 систем ДЗЗ, приведенный в таблице.

Помимо спутниковой съемки в задачах экологического мониторинга также повсеместно применяются данные аэрофотосъемки с помощью БПЛА, так как она позволяет получить более высокое пространственное разрешение снимка на местности [19]. Применительно к задачам автоматического экологического мониторинга к особенностям данного источника можно отнести:

Системы дистанционного зондирования Земли

Earth remote sensing systems

Спутник	Задача спутника	Разрешающая способность, метров на пиксель	Открытый доступ	Периодичность обновления данных, сутки	Формат данных
КА "Канопус-В" [9]	Мониторинг природных и техногенных катастроф, а также анализ экосистем	12–16	Есть	5	GeoTIFF
КА "Ресурс-П" [10]	Изучение состояния и динамики ландшафта, лесов, водоемов, а также изменений климата	1–30	Есть	3	GeoTIFF
КА "Экспресс-АМ" [11]	Получение информации для мониторинга природных ресурсов, изменений природных и техногенных катастроф	10–60	Есть	4	GeoTIFF
КА "Экспресс-РВ" [12]	Мониторинг территории России	8–16	Ограничен	3	GeoTIFF
Landsat [13]	Измерение изменений в земной поверхности, в том числе изменения в растительности, снеге, льде и водных ресурсах	15–30	Есть	16	GeoTIFF
Sentinel-2 [14]	Мониторинг условий, в которых происходят изменения земли, лесных ресурсов, зданий и городской динамики	10–60	Есть	10	GeoTIFF
MODIS [15]	Получение изображений для метеорологических и климатических исследований	250–1000	Есть	1-2	GeoTIFF
Landsat-8 [16]	Измерение изменений в земной поверхности, в том числе изменения в растительности, снеге, льде и водных ресурсах	15–30	Есть	16	GeoTIFF
Sentinel-3 [17]	Мониторинг морских цветов, температуры и уровня моря, а также климата	300–1000	Есть	3	NRT
Suomi NPP [18]	Изучение климатических факторов и способности земли к поддержанию жизни	375–750	Есть	1	HD5

1. Качество снимков, полученных с БПЛА, напрямую определяется типом камеры, высотой полета, технологией стабилизации кадра, настройками оборудования, а также в гораздо большей степени зависит от атмосферных условий во время съемки. При этом применяемые алгоритмы обработки снимков и видеопотока

практически всегда требуют применения автоматизированных или автоматических процедур калибровки камер [20] для обеспечения привязки к масштабу объектов съемки и минимизации искажений оптической системы БПЛА.

Разработка системы экологического мониторинга

на базе технологий пространственной разметки и машинного зрения

Development of an Environmental Monitoring System Based on Spatial Marking and Machine Vision Technologies

2. Главный этап пространственной разметки – геопространственная привязка снимков –

также может значительно варьироваться по точности в зависимости от типов БПЛА и используемых технологий. Так, например, использование глобальных навигационных систем [21] зависит от спутникового покрытия и качества сигнала. Применение оптических и инерциальных методов навигации [22] требует развитых методов фильтрации шума и априорных данных о начальных координатах БПЛА в глобальной системе координат.

Подводя итог анализу применимости данных ДЗЗ и аэрофотосъемки БПЛА для автоматического экологического мониторинга в рамках единой программной системы, можно сделать вывод, что обработка данных возможна только при условии учета индивидуальных особенностей каждого конкретного источника данных и при обеспечении процедур унификации снимков, которые позволят объединять данные разных источников в один массив.

Современные программные средства для решения задач экологического мониторинга можно условно разделить на две группы: инструменты интеллектуальной обработки данных и географические информационные системы.

Инструменты интеллектуальной обработки данных включают в себя средства интеллектуального анализа данных [23], а также модели ИИ и машинного обучения [24]. Данные инструменты позволяют обрабатывать большие объемы информации об экологических условиях, обобщать и выявлять тенденции, прогнозировать изменения. Как правило, подобные инструменты широко опираются на предобработанные и размеченные массивы экологических данных, где данные приведены к общей форме.

Геоинформационные системы (ГИС) [25] – это программно-аппаратные комплексы, которые позволяют собирать, хранить, анализировать и представлять геопространственные данные, такие как карты и снимки со спутников. ГИС могут использоваться для мониторинга изменений в экосистемах, планирования использования земель, принятия решений по охране окружающей среды. Важно отметить, что по своей структуре ГИС ориентированы на решение общих задач пространственной разметки. Кроме того, ГИС чаще всего представляют собой дорогостоящие в поддержке монолит-

ные системы [26], поэтому внесение изменений в них, а также, например, подключение новых источников данных может быть сложным.

Важно отметить, что обе группы инструментов не имеют четкой границы. Так, например, в современных ГИС существуют интегрированные инструменты для работы с моделями интеллектуальной обработки данных [27]. Однако существенной проблемой традиционных инструментов остается ограниченная применимость: инструменты интеллектуальной обработки данных ориентированы на сами данные, ГИС ориентированы на пространственные задачи. Помимо этого проблемой является и сложность подключения новых источников данных. Поэтому для построения открытой программной системы экологического мониторинга необходимо учесть эти недостатки на уровне архитектуры путем общей ориентации на задачу работы с разнородными источниками, а также за счет обеспечения гибкости и расширяемости системы методами и моделями анализа.

Архитектура программной системы. Проведенный обзор показал, что снимки из открытых источников не пригодны для совместного анализа и дальнейшего мониторинга без предварительной подготовки, так как даже данные из одного класса источников могут иметь различные характеристики и требовать разных подходов для фильтрации и унификации. Для преодоления гетерогенности в основу архитектуры разрабатываемой программной системы необходимо положить обобщенный метод унификации исходных данных. Метод должен проводить пространственную разметку данных для обеспечения их совместного использования в процессе анализа экологических данных. Поскольку ключевым вопросом к исходным данным выступает их принципиальная пригодность, то метод целесообразно представить как конвейер из четырех последовательных этапов: пространственная разметка, фильтрация, сегментация, фрагментация. Результат выполнения предыдущего этапа выступает в качестве входных данных для последующего. Выполнение этапов метода сводится к вычислениям над исходными данными и подразумевает сохранение результатов вычислений в модели данных, поддерживающей индексацию

геоданных. Метод задает общую логику обработки данных, выбор отдельных алгоритмов и их реализаций, составляющих тот или иной этап, диктуется спецификой экологической задачи и сценария использования.

Первым этапом выступает пространственная разметка снимков, подразумевающая приведение исходных изображений в соответствие с географическими системам координат. Для определенности, в качестве основной используется система географических координат WGS 84 (World Geodetic System) [28]. Пространственная разметка сводится к следующим шагам:

1. Фиксация в модели данных параметров в локальной системе координат, разрешения обрабатываемого снимка в пикселях, координат углов в локальной системе координат.

2. Вычисление координат углов снимка в системе WGS84.

3. Включение координат углов снимков (в локальной системе координат и WGS84) в географические индексы.

Следующим этапом обработки является фильтрация снимков. Шумы на исходных снимках могут быть вызваны атмосферными условиями, такими как туман, облака или дым, вызывающими размытие или изменение цвета, а также внешними факторами, например многократным отражением или отражением от поверхностей различных материалов. Также качество снимков может быть понижено из-за технических причин, связанных с процессами съемки, передачи, обработки и хранения данных. Фильтрация используется для улучшения снимков путем удаления шума при сохранении полезных данных за счет применения математических операций к значениям пикселей снимка или его части. Наиболее часто используемыми видами являются медианная и гауссова [29], а также анизотропная фильтрации [30]. В качестве начального фильтра, позволяющего убрать импульсные шумы, может быть использована фильтрация по медиане за счет простоты реализации и скорости работы. В случае необходимости усиления границ и контуров областей на снимках, а также устранения эффектов наложения спектров может быть применена анизотропная фильтрация. После применения фильтров полученные снимки необходимо сохранить в

базе данных для дальнейшей обработки.

Следующим этапом предобработки снимков является сегментация. Цель данного этапа – разметка снимков и последующее создание масок для выделения объектов интереса, важных в решаемой экологической задаче. Это необходимо для того, чтобы обеспечить более точную и эффективную работу алгоритмов обработки, а также избежать возможных ошибок, связанных с влиянием облачности и других атмосферных явлений. Для создания масок необходимо выполнить следующие шаги:

1. Сегментация снимка на регионы с похожими характеристиками.

2. Выделение контуров соответствующих регионов, выделенных на снимке.

3. Построение маски путем преобразования контуров.

Полученные маски используются для исключения непригодных участков из дальнейшей обработки или для дополнительного анализа в случае необходимости. При использовании мультиспектральных данных на этапе сегментации дополнительно возможен анализ спектров для определения элементов земной поверхности, по-разному отражающих падающее на них излучение. Этот анализ позволяет изучить спектральные характеристики объекта и определить его особенности. Например, для оценки растительного покрова чаще всего используется вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [31], который вычисляется на основе разницы между значениями инфракрасного и видимого спектров.

Завершающим этапом обработки является фрагментация снимков, которая необходима для упрощения визуализации результатов обработки конечным пользователям. Ввиду высокого разрешения съемки снимки могут иметь большой размер: от сотен мегабайт до нескольких гигабайт. Помимо неудобства просмотра обработка таких больших снимков может быть трудоемкой с точки зрения вычислений, требующих значительного объема памяти и вычислительной мощности. Чтобы решить эту проблему, снимки разделяют на более мелкие фрагменты, которые легче обрабатывать и анализировать. Фрагменты представляют собой квадратные или прямоугольные изображения, с

фиксированной шириной и высотой, создаваемые разделением снимка на перекрывающиеся участки одинакового размера, которые затем обрезаются и сохраняются в базе данных как отдельные файлы. Помимо упрощения обработки, фрагментация обеспечивает более быструю загрузку и отображение таких снимков на конечных устройствах в виде интерактивных карт, позволяя пользователям отслеживать изменения окружающей среды по мере их возникновения.

В качестве источников данных используются открытые порталы спутниковых данных Copernicus Open Access Hub [32] и Earthdata [33], содержащие данные семейства спутников Sentinel и предоставляющие снимки земной поверхности с пространственной привязкой, обновляемые не реже одного раза в месяц.

Для реализации метода в виде программной системы необходимо использовать модульную клиент-серверную архитектуру. Такой тип архитектуры позволяет дополнять систему новыми источниками данных путем подключения к ней нового модуля загрузки данных, а также новых алгоритмов с помощью унифицированных интерфейсов.

Серверная часть реализует логику периодической загрузки гетерогенных данных из открытых источников (порталы спутниковых данных и репозитории данных БПЛА), логику выполнения метода унификации данных и обслуживает запросы клиентской части. Клиентская часть предоставляет интерфейс для ручной загрузки исходных данных, конфигурирования автоматической выгрузки данных, выполнения задач экологического мониторинга, просмотра отчетов и визуализации обрабатываемых данных.

Пользовательский сценарий (рис. 1) использования разработанной системы:

1. Пользователь запрашивает снимок выбранной области.
2. Выбор источника снимка (спутник/БПЛА).
3. Если выбранной области нет в хранилище, система инициирует загрузку выбранной области из источника с помощью соответствующего модуля, а затем обработает загруженный снимок.

4. Снимок проходит четыре стадии предобработки в рамках метода унификации: пространственная разметка, фильтрация, сегментация и фрагментация.

5. Предобработанный снимок передается алгоритму экологического анализа.

6. Результат выполнения экологического анализа (размеченный снимок, текстовая статистика) в виде отчета демонстрируется пользователю.

При необходимости анализ может быть повторен автоматически на регулярной основе при наличии новых снимков в источнике с помощью модуля "Планировщик". Результаты таких повторных запусков также доступны пользователю в формате отчетов.

Модель данных. Поскольку работа обобщенного метода унификации данных подразумевает хранение большого количества данных, необходимо сформировать эффективную модель данных для поддержки процесса. ER-диаграмма модели представлена на рис. 2.

Модель данных формализует данные предметной области с помощью следующих сущностей:

- Image – исходные и обработанные снимки;
- Scale – масштаб снимка по осям x и y ;
- Resolution – разрешение снимка в пикселях и метрах в соответствующей системе координат;
- Bounds – границы снимка в пикселях и метрах в соответствующей системе координат;
- Corner – координаты угла снимка в локальной системе координат;
- Metadata – метаданные, изъятая из снимка – exif-тег, используемая система координат;
- AlgorithmMetadata – коллекция для хранения параметров используемых алгоритмов анализа;
- CheckResult – хранение статистики обработки снимков.

Основной коллекцией в базе данных является Image, используемая для хранения информации о каждом снимке, включая промежуточные версии. Остальные коллекции связываются с Image путем одноименных полей, выступающих как внешние ключи. Ключевыми атрибутами Image являются:

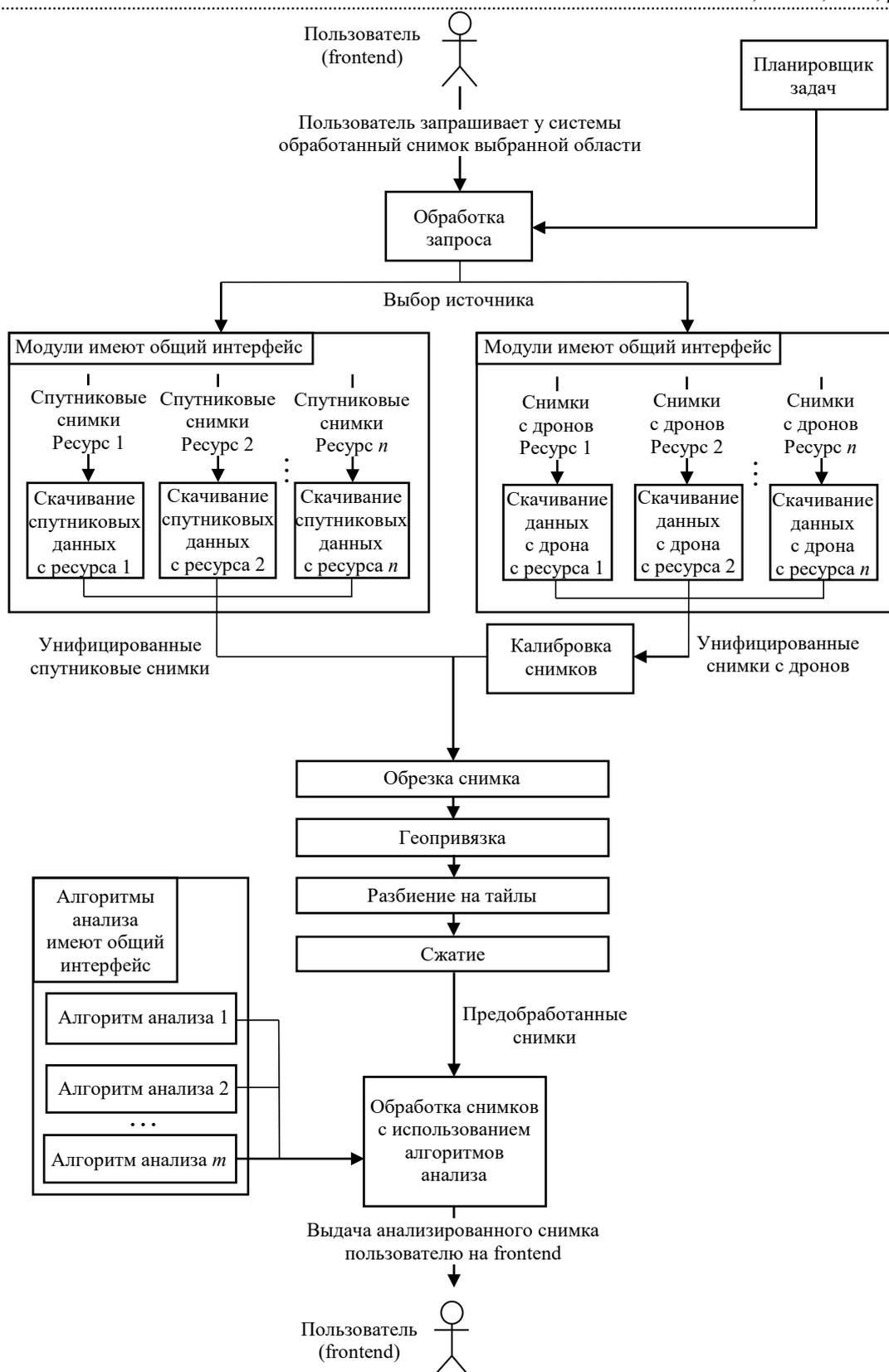


Рис. 1. Архитектура программного средства

Fig. 1. Software architecture

– stage – стадия обработки снимка, соответствующая этапу обработки в рамках обобщенного метода унификации; – created_at – дата создания снимка;

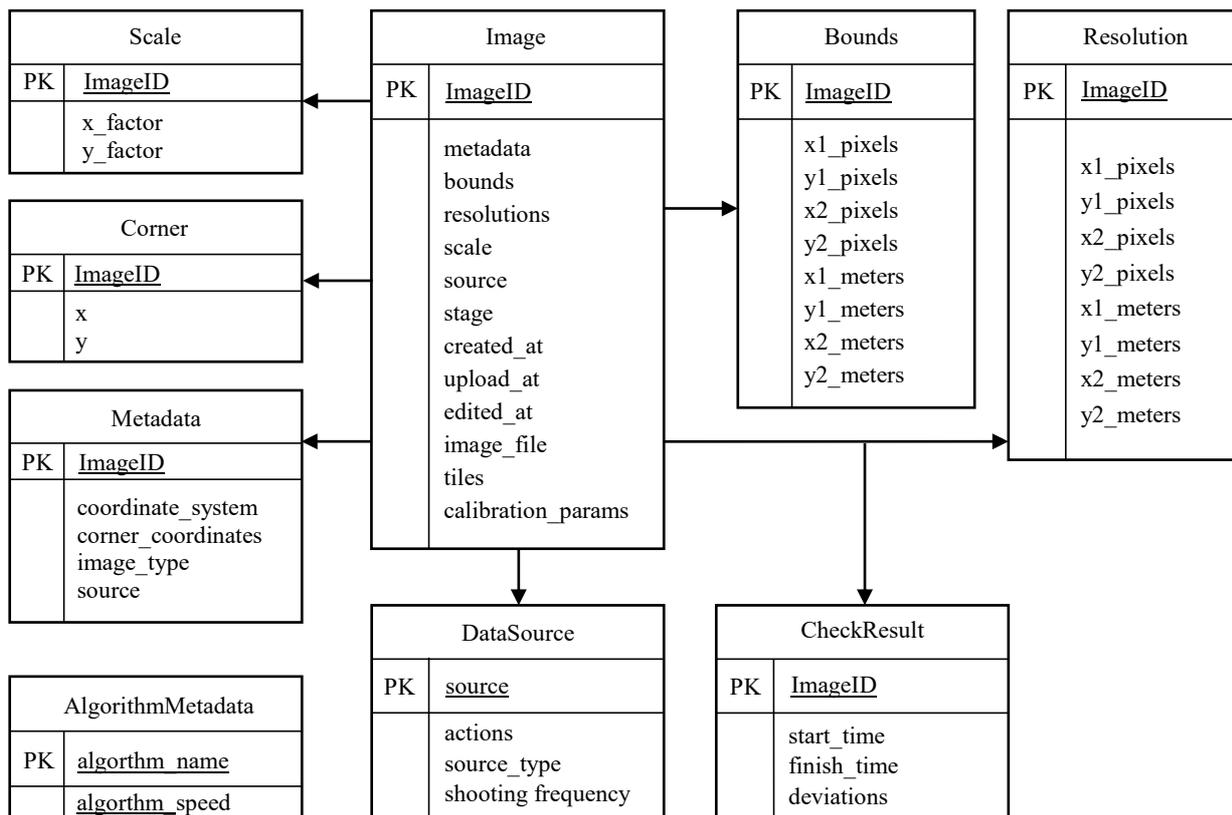


Рис. 2. ER-диаграмма модели данных

Fig. 2. Data model ER-diagram

- edited_at – дата последнего изменения снимка;
- upload_at – дата загрузки снимка;
- image_file – файл снимка;
- tiles – ссылка на другие записи коллекции Images, являющиеся уменьшенными сжатыми фрагментами исходного снимка (результат этапа фрагментации);
- calibration_params – параметры калибровки снимка.

Описанная модель данных использует подход раздельного хранения сущностей, однако не является реляционной, так как, учитывая особенности поставленной задачи (гетерогенность данных и источников), возникает необходимость использования произвольных схем формирования структуры полей атрибутов отдельных коллекций. Поэтому рекомендуемой технологией для ее реализации выступают документоориентированные системы управления базами данных (СУБД) как компромисс между возможностью раздельного хранения сущностей и гибкостью схемы данных.

Реализация системы. Предложенные в предыдущих разделах метод унификации данных, архитектура обработки снимков и модель данных были реализованы в формате микросервисного приложения, предоставляющего веб-интерфейс для пользователей.

Метод унификации данных и архитектура были реализованы с использованием технологии Docker [34] – логика многоэтапной обработки снимков воплощена в виде отдельных контейнеров, которые взаимодействуют между собой по внутренней изолированной сети, что позволяет обеспечить безопасность данных системы и реализовать горизонтальное масштабирование отдельных этапов и алгоритмов анализа.

Этап взаимодействия с репозиториями снимков реализован с помощью библиотеки Requests [35]. На данный момент реализовано взаимодействие с этапом пространственной разметки и фрагментации снимков путем создания обобщенной библиотеки преобразования формата Geotiff и вызова вспомогательных методов библиотек Gdal и Rasterio [36].

В качестве инструмента развертывания также использована технология Docker, так как она позволяет максимально абстрагироваться от особенностей среды сервера. Взаимодействие серверного компонента с веб-интерфейсом реализовано через фреймворк Flask [37].

Для реализации модели данных используется документоориентированная СУБД MongoDB [38], так как она имеет встроенное эффективное файловое хранилище gridFS, в котором можно размещать снимки, а также обладает другими необходимыми для модели преимуществами: гибкой схемой данных, поддержкой двух типов пространственных индексов (плоские и сферические координаты), возможностью обеспечить хранение данных в циклическом буфере. Последнее свойство является важным для эксплуатации системы, так как при регулярной загрузке новых снимков файловое хранилище может быстро заполниться.

Для наполнения разработанной программной системы реализациями этапов метода унификации и алгоритмами анализа и используются Python-модули. В качестве интерфейсов для подключения алгоритмов используется комбинация из двух методов:

1) processImage (sourceImage, params, callback): successFlag;

2) getAlgorithmMetadata(): algorithmMetada.

Аргумент sourceImage соответствует ссылке на файл исходного снимка; params задает индивидуальные настройки работы алгоритма (параметры, точность работы); callback – функция обратного вызова, задающая обработчик прогресса выполнения алгоритма анализа вида callback (sourceImage, progress, estimate, logs, status), где:

1) sourceImage – ссылка на файл исходного снимка;

2) progress – прогресс обработки в процентах;

3) estimate – ожидаемое время завершения работы алгоритма;

4) logs – ссылка на текущий массив журнала исполнения алгоритма;

5) status – бинарный статус завершения процедуры анализа.

Значение algorithmMetadata соответствует набору полей, характеризующих зависимости и особенности алгоритма (необходимо во внешних сервисах, наличие модулей машинного обучения).

Предложенная структура расширения программной системы экологического мониторинга в виде Python-модулей, с одной стороны, обеспечивает максимальную гибкость архитектуры, а с другой – отсутствие привязки к конкретным библиотекам и технологиям, а также возможность контроля исполнения реализаций алгоритмов.

Заключение. В работе был проведен анализ открытых источников данных для решения актуальных проблем экологического мониторинга, показавший возможность проведения качественного исследования на основании открытых спутниковых данных. Сравнение подходов к выполнению экологического мониторинга показало, что существующие решения не приспособлены к обработке гетерогенных исходных данных из различных источников, а также имеют проблемы, связанные с гибкостью интеграции новых методов анализа. Для преодоления обнаруженных проблем был сформулирован обобщенный метод унификации данных. Метод позволяет поэтапно приводить гетерогенные RGB-снимки из различных источников к форме, пригодной для дальнейшего экологического анализа, путем применения методов пространственной разметки, фильтрации и сегментации данных. Для воплощения метода в виде программной системы была разработана архитектура и модель данных, позволяющие организовать одновременную масштабируемую работу с большим количеством источников гетерогенных данных. Метод, архитектура и модель были реализованы в виде программной системы с веб-интерфейсом и микросервисной организацией. Разработанная система позволяет вести согласованный экологический мониторинг для данных ДЗЗ и аэрофотосъемки БПЛА. При этом возможен как ручной импорт снимков, так и автоматическая загрузка из открытых репозиторий. Реализация системы на базе полностью открытых технологий делает ее использование доступным для большого числа пользователей, а использование современных технологий контейнеризации и СУБД позволяет проводить экологический мониторинг на различном по мощности аппаратном обеспечении. В качестве дальнейшей работы предполагается экспериментальное исследование производительности разработанной системы и оценка возможности ее внедрения для решения задачи экологического мониторинга.

Список литературы

1. Corwin D. L. Climate Change Impacts on Soil Salinity in Agricultural Areas // *European J. of Soil Science*. 2021. Vol. 72, iss. 2. P. 842–862. doi: 10.1111/ejss.13010
2. Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios / S. G. Yalew, M. T. H. van Vliet, D. E. H. J. Gernaat, F. Ludwig, A. Miara, C. Park, E. Byers, E. De Cian, F. Piontek, G. Iyer, I. Mouratiadou, J. Glynn, M. Hejazi, O. Dessens, P. Rochedo, R. Pietzcker, R. Schaeffer, S. Fujimori, S. Dasgupta, S. Mima, S. R. Santos da Silva, V. Chaturvedi, R. Vautard, D. P. van Vuuren // *Nature Energy*. 2020. Vol. 5, № 10. P. 794–802. doi: 10.1038/s41560-020-0664-z
3. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost / D. A. Streletskiy, L. J. Suter, N. I. Shiklomanov, B. N. Porfiriev, D. O. Eliseev // *Environmental Research Letters*. 2019. Vol. 14, № 2. P. 025003. doi: 10.1088/1748-9326/aaf5e6
4. Recent advances in Unmanned Aerial Vehicles forest remote sensing – A systematic review. Pt. II: Research applications / R. Dainelli, P. Toscano, S. F. Di Gennaro, A. Matese // *Forests*. 2021. Vol. 12, iss. 4. P. 397. doi: 10.3390/f12040397
5. Ahmad A., Gilani H., Ahmad S. R. Forest above-ground biomass estimation and mapping through high-resolution optical satellite imagery – A literature review // *Forests*. 2021. Vol. 12, iss. 7. P. 914. doi: 10.3390/f12070914
6. Artificial intelligence meets citizen science to supercharge ecological monitoring / E. C. McClure, M. Sievers, C. J. Brown, C. A. Buelow, E. M. Ditria, M. A. Hayes, R. M. Pearson, V. J. D. Tulloch, R. K. F. Unsworth, R. M. Connolly // *Patterns*. 2020. Vol. 1, iss. 7. P. 100109. doi: 10.1016/j.patter.2020.100109
7. A systematic review on the integration of remote sensing and gis to forest and grassland ecosystem health attributes, indicators, and measures / I. Soubry, T. Doan, T. Chu, X. Guo // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, iss. 16. P. 3262. doi: 10.3390/rs13163262
8. Toth C., Józkw G. Remote sensing platforms and sensors: A survey // *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016. Vol. 115. P. 22–36. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004
9. КА "Канопус-В" № 1 – первый российский малый космический аппарат высокодетального дистанционного зондирования Земли нового поколения / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов, Р. С. Салихов, В. П. Ходненко // *Вопр. электромеханики. Тр. ВНИИЭМ*. 2017. Т. 156, № 1. С. 10–20.
10. Космическая система дистанционного зондирования Земли "Ресурс-П" / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, Г. П. Аншаков, А. Д. Сторож, Н. Р. Стратилатов, В. А. Типухов // *XL Академические чтения по космонавтике, Москва, 26–29 янв. 2016 г. М., 2016. С. 350.*
11. Григорьев А. А., Баранов М. Е. Эксплуатация программной модели космического аппарата связи "Экспресс-АМ" // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2018. Т. 2, № 14. С. 507–509.
12. Локшин Б. "Экспресс-РВ"-перспективная система связи со спутниками на высокоэллиптических орбитах // *Технологии и средства связи*. 2019. № S1. С. 62–71.
13. Irons J. R., Dwyer J. L., Barsi J. A. The next Landsat satellite: The Landsat data continuity mission // *Remote sensing of environment*. 2012. Vol. 122. P. 11–21. doi: 10.1016/j.rse.2011.08.026
14. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services / M. Drusch, U. Del Bello, S. Carlier, O. Colin, V. Fernandez, F. Gascon, B. Hoersch, C. Isola, P. Laberinti, P. Martimort, A. Meygret, F. Spoto, O. Sy, F. Marchese, P. Bargellini // *Remote sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 25–36. doi: 10.1016/j.rse.2011.11.026
15. Fusing Landsat and MODIS data for vegetation monitoring / F. Gao, T. Hilker, X. Zhu, M. Anderson, J. Masek, P. Wang, Y. Yang // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2015. Vol. 3, iss. 3. P. 47–60. doi: 10.1109/MGRS.2015.2434351
16. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research / D. P. Roy, M. A. Wulder, T. R. Loveland et al. // *Remote sensing of Environment*. 2014. Vol. 145. P. 154–172. doi: 10.1016/j.rse.2014.02.001
17. The global monitoring for environment and security (GMES) sentinel-3 mission / C. Donlon, B. Berruti, A. Buongiorno, M.-H. Ferreira, P. Féménias, J. Frerick, P. Goryl, U. Klein, H. Laur, C. Mavrocordatos, J. Nieke, H. Rebhan, B. Seitz, J. Stroede, R. Sciarra // *Remote sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 37–57. doi: 10.1016/j.rse.2011.07.024
18. Suomi NPP VIIRS sensor data record verification, validation, and long-term performance monitoring / C. Cao, J. Xiong, S. Blonski, Q. Liu, S. Uprety, X. Shao, Y. Bai, F. Weng // *J. of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. Vol. 118, iss. 20. P. 11664–11678. doi: 10.1002/2013jd020418
19. Morgan J. L., Gergel S. E., Coops N. C. Aerial photography: a rapidly evolving tool for ecological management // *BioScience*. 2010. Vol. 60, № 1. P. 47–59. doi: 10.1525/bio.2010.60.1.9
20. Zhang Y. J. Camera calibration // *3-D Computer Vision: Principles, Algorithms and Applications*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. P. 37–65. doi: 10.1007/978-981-19-7580-6_2
21. Hein G. W. Status, perspectives and trends of satellite navigation // *Satellite Navigation*. 2020. Vol. 1, № 1. P. 22. doi: 10.1186/s43020-020-00023-x
22. Petritoli E., Leccese F., Leccisi M. Inertial navigation systems for UAV: Uncertainty and error measurements // *2019 IEEE 5th Intern. Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. Turin, Italy.

19–21 June 2019. IEEE, 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869618

23. A practical guide to selecting models for exploration, inference, and prediction in ecology / A. T. Tredebeck, G. Hooker, S. P. Ellner, P. B. Adler // *Ecology*. 2021. Vol. 102, iss. 6. P. e03336. doi: 10.1002/ecy.3336

24. Machine learning in landscape ecological analysis: a review of recent approaches / M.-S. Stupariu, S. A. Cushman, A.-I. Pleşoianu, I. Pătru-Stupariu, C. Furst // *Landscape Ecology*. 2022. Vol. 37, iss. 5. P. 1227–1250. doi: 10.1007/s10980-021-01366-9

25. A systematic review on the integration of remote sensing and GIS to forest and grassland ecosystem health attributes, indicators, and measures / I. Soubry, T. Doan, T. Chu, X. Guo // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, iss. 16. P. 3262. doi: 10.3390/rs13163262

26. Paramasivam C. R. Merits and demerits of GIS and geostatistical techniques // *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*. 2019. P. 17–21. doi: 10.1016/B978-0-12-815413-7.00002-X

27. Merging GIS and Machine Learning Techniques: A Paper Review / C. V. Ekeanyanwu, I. F. Obisakin, P. Aduwenye, N. Dede-Bamfo // *J. of Geoscience and Environment Protection*. 2022. Vol. 10, № 9. P. 61–83. doi: 10.4236/gep.2022.109004

28. Wong R. F., Rollins C. M., Minter C. F. Recent updates to the WGS 84 reference frame // *Proc. of the 25th Intern. Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*. Nashville, TN. 17–21 Sept. 2012. P. 1164–1172.

29. Verma R., Ali J. A comparative study of various types of image noise and efficient noise removal techniques // *Intern. J. of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. 2013. Vol. 3, iss. 10. P. 617–622.

30. Ochotorena C. N., Yamashita Y. Anisotropic guided filtering // *IEEE Transactions on Image Pro-*

cessing. 2019. Vol. 29. P. 1397–1412. doi: 10.1109/TIP.2019.2941326

31. A rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform / M. A. Hassan, M. Yang, A. Rasheed, G. Yang, M. Reynolds, X. Xia, Y. Xiao, Z. He // *Plant science*. 2019. Vol. 282. P. 95–103. doi: 10.1016/j.plantsci.2018.10.022

32. Copernicus Open Access Hub. URL: <https://scihub.copernicus.eu> (дата обращения: 10.07.2023).

33. Earthdata. URL: <https://www.earthdata.nasa.gov> (дата обращения: 10.07.2023).

34. Jaramillo D., Nguyen D. V., Smart R. Leveraging microservices architecture by using Docker technology. *SoutheastCon 2016. IEEE, 2016. P. 1–5. doi: 10.1109/SECON.2016.7506647*

35. Requests: HTTP for Humans™. URL: <https://requests.readthedocs.io/> (дата обращения: 10.07.2023).

36. Qin C. Z., Zhan L. J., Zhu A. X. How to apply the geospatial data abstraction library (GDAL) properly to parallel geospatial raster I/O? // *Transactions in GIS*. 2014. Vol. 18, iss. 6. P. 950–957. doi: 10.1111/tgis.12068

37. pallets/flask: The Python micro framework for building web applications // *GitHub*. URL: <https://github.com/pallets/flask> (дата обращения: 10.07.2023).

38. Jose B., Abraham S. Exploring the merits of nosql: A study based on mongodb // *2017 Intern. Conf. on Networks & Advances in Computational Technologies (NetACT)*. Thiruvananthapuram, India. 20–22 July 2017. IEEE, 2017. P. 266–271. doi: 10.1109/NETACT.2017.8076778

Информация об авторах

Заславский Марк Маркович – кандидат технических наук (2019), заместитель заведующего кафедрой математического обеспечения и применения ЭВМ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 15 научных работ. Сфера научных интересов – пространственная разметка; искусственный интеллект; машинное зрение; обработка аудио; автоматизация оценивания учебных работ.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: mark.zaslavskiy@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9084-3604>

Крыжановский Кирилл Евгеньевич – магистрант по направлению "Программная инженерия", Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), младший разработчик программного обеспечения ООО "Яндекс". Сфера научных интересов – искусственный интеллект; компьютерное зрение; беспилотные летательные аппараты; алгоритмы ориентации и навигации.

Адрес: ООО "Яндекс", ул. Льва Толстого, д. 16, Москва, 119021, Россия

E-mail: kirill.lfybk.rh@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2246-8929>

Иванов Дмитрий Владимирович – аспирант по направлению "Компьютерные науки и информатика", ассистент кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – рои дронов; пространственная разметка; искусственный интеллект; машинное зрение.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

Разработка системы экологического мониторинга

на базе технологий пространственной разметки и машинного зрения

Development of an Environmental Monitoring System Based on Spatial Marking and Machine Vision Technologies

References

1. Corwin D. L. Climate Change Impacts on Soil Salinity in Agricultural Areas. *European J. of Soil Science*. 2021, vol. 72, iss. 2, pp. 842–862. doi: 10.1111/ejss.13010
2. Yalaw S. G., van Vliet M. T. H., Gernaat D. E. H. J., Ludwig F., Miara A., Park C., Byers E., De Cian E., Piontek F., Iyer G., Mouratiadou I., Glynn J., Hejazi M., Dessens O., Rochedo P., Pietzcker R., Schaeffer R., Fujimori S., Dasgupta S., Mima S., Santos da Silva S. R., Chaturvedi V., Vautard R., van Vuuren D. P. Impacts of Climate Change on Energy Systems in Global and Regional Scenarios. *Nature Energy*. 2020, vol. 5, no. 10, pp. 794–802. doi: 10.1038/s41560-020-0664-z
3. Streletskiy D. A., Suter L. J., Shiklomanov N. I., Porfiriev B. N., Eliseev D. O. Assessment of Climate Change Impacts on Buildings, Structures and Infrastructure in the Russian Regions on Permafrost. *Environmental Research Letters*. 2019, vol. 14, no. 2, p. 025003. doi: 10.1088/1748-9326/aaf5e6
4. Dainelli R., Toscano P., Gennaro S. F. Di, Matese A. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles Forest Remote Sensing – A Systematic Review. Part II: Research Applications. *Forests*. 2021, vol. 12, iss. 4, p. 397. doi: 10.3390/f12040397
5. Ahmad A., Gilani H., Ahmad S. R. Forest Aboveground Biomass Estimation and Mapping Through High-Resolution Optical Satellite Imagery – A Literature Review. *Forests*. 2021, vol. 12, iss. 7, p. 914. doi: 10.3390/f12070914
6. McClure E. C., Sievers M., Brown C. J., Buelow C. A., Ditria E. M., Hayes M. A., Pearson R. M., Tulloch V. J. D., Unsworth R. K. F., Connolly R. M. Artificial Intelligence Meets Citizen Science to Supercharge Ecological Monitoring. *Patterns*. 2020, vol. 1, iss. 7, p. 100109. doi: 10.1016/j.patter.2020.100109
7. Soubry I., Doan T., Chu T., Guo X. A Systematic Review on the Integration of Remote Sensing and Gis to Forest and Grassland Ecosystem Health Attributes, Indicators, and Measures. *Remote Sensing*. 2021, vol. 13, iss. 16, p. 3262. doi: 10.3390/rs13163262
8. Toth C., Józkó G. Remote Sensing Platforms and Sensors: A Survey. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016, vol. 115, pp. 22–36. doi: 10.1016/J.ISPRSJPRS.2015.10.004
9. Makridenko L. A., Volkov S. N., Gorbunov A. V., Salihov R. S., Hodnenko V. P. The First Russian Next Generation High Resolution Earth Remote Sensing Small Satellite Canopus-V No. 1. *Voprosy jelectromehaniki. Trudy VNIIEJem* [Questions of electromechanics. Proceedings of VNIIEJem]. 2017, vol. 156, no. 1, pp. 10–20. (In Russ.)
10. Kirilin A. N., Akhmetov R. N., Anshakov G. P., Storozh A. D., Stratilatov N. R., Tipukhov V. A. Space System of Remote Sensing of the Earth "Resource-P". *XL Akademicheskie chtenija po kosmonavtike* [XL Academic Readings in Astronautics]. Moscow, 26–29 January 2016, p. 350. (In Russ.)
11. Grigoryev A. A., Baranov M. E. Maintenance of the Software Models of the Spacecraft Communication "Express-AM". *Current Problems of Aviation and Cosmonautics*. 2018, vol. 2, no. 14, pp. 507–509. (In Russ.)
12. Lokshin B. Express-RV as a Forward-Looking Communications System with Satellites in Highly Elliptical Orbits. *Communication Technologies & Equipment*. 2019, no. S1, pp. 62–71. (In Russ.)
13. Irons J. R., Dwyer J. L., Barsi J. A. The Next Landsat Satellite: The Landsat Data Continuity Mission. *Remote Sensing of Environment*. 2012, vol. 122, pp. 11–21. doi: 10.1016/j.rse.2011.08.026
14. Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., Meygret A., Spoto F., Sy O., Marchese F., Bargellini P. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*. 2012, vol. 120, pp. 25–36. doi: 10.1016/j.rse.2011.11.026
15. Gao F., Hilker T., Zhu X., Anderson M., Masek J., Wang P., Yang Y. Fusing Landsat and MODIS Data for Vegetation Monitoring. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2015, vol. 3, iss. 3, pp. 47–60. doi: 10.1109/MGRS.2015.2434351
16. Roy D. P., Wulder M. A., Loveland T. R. et al. Landsat-8: Science and Product Vision for Terrestrial Global Change Research. *Remote Sensing of Environment*. 2014, vol. 145, pp. 154–172. doi: 10.1016/j.rse.2014.02.001
17. Donlon C., Berruti B., Buongiorno A., Ferreira M.-H., Féménias P., Frerick J., Goryl P., Klein U., Laur H., Mavrocordatos C., Nieke J., Rebhan H., Seitz B., Stroede J., Sciarra R. The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 Mission. *Remote Sensing of Environment*. 2012, vol. 120, pp. 37–57. doi: 10.1016/j.rse.2011.07.024
18. Cao C., Xiong J., Blonski S., Liu Q., Uprety S., Shao X., Bai Y., Weng F. Suomi NPP VIIRS Sensor Data Record Verification, Validation, and Long-Term Performance Monitoring. *J. of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013, vol. 118, iss. 20, pp. 11664–11678. doi: 10.1002/2013jd020418
19. Morgan J. L., Gergel S. E., Coops N. C. Aerial Photography: a Rapidly Evolving Tool for Ecological Management. *BioScience*. 2010, vol. 60, no. 1, pp. 47–59. doi: 10.1525/bio.2010.60.1.9
20. Zhang Y. J. Camera Calibration. 3-D Computer Vision: Principles, Algorithms and Applications. Singapore, Springer Nature Singapore, 2023, pp. 37–65. doi: 10.1007/978-981-19-7580-6_2
21. Hein G. W. Status, Perspectives and Trends of Satellite Navigation. *Satellite Navigation*. 2020, vol. 1, no. 1, p. 22. doi: 10.1186/s43020-020-00023-x

22. Petritoli E., Leccese F., Leccisi M. Inertial Navigation Systems for UAV: Uncertainty and Error Measurements. 2019 IEEE 5th Intern. Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). Turin, Italy. 19–21 June 2019. IEEE, 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869618
23. Tredennick A. T., Hooker G., Ellner S. P., Adler P. B. A Practical Guide to Selecting Models for Exploration, Inference, and Prediction in Ecology. *Ecology*. 2021, vol. 102, iss. 6, p. e03336. doi: 10.1002/ecy.3336
24. Stupariu M.-S., Cushman S. A., Pleşoiu A.-I., Pătru-Stupariu I., Fürst C. Machine Learning in Landscape Ecological Analysis: A Review of Recent Approaches. *Landscape Ecology*. 2022, vol. 37, iss. 5, pp. 1227–1250. doi: 10.1007/s10980-021-01366-9
25. Soubry I., Doan T., Chu T., Guo X. A Systematic Review on the Integration of Remote Sensing and Gis to Forest and Grassland Ecosystem Health Attributes, Indicators, and Measures. *Remote Sensing*. 2021, vol. 13, iss. 16, p. 3262. doi: 10.3390/rs13163262
26. Paramasivam C. R. Merits and Demerits of GIS and Geostatistical Techniques. *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*. 2019, pp. 17–21. doi: 10.1016/B978-0-12-815413-7.00002-X
27. Ekeanyanwu C. V., Obisakin I. F., Aduwenye P., Dede-Bamfo N. Merging GIS and Machine Learning Techniques: A Paper Review. *J. of Geoscience and Environment Protection*. 2022, vol. 10, no. 9, pp. 61–83. doi: 10.4236/gep.2022.109004
28. Wong R. F., Rollins C. M., Minter C. F. Recent Updates to the WGS 84 Reference Frame. *Proc. of the 25th Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*. Nashville, TN. 17–21 September 2012, pp. 1164–1172.
29. Verma R., Ali J. A Comparative Study of Various Types of Image Noise and Efficient Noise Removal Techniques. *Intern. J. of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. 2013, vol. 3, iss. 10, pp. 617–622.
30. Ochotorena C. N., Yamashita Y. Anisotropic Guided Filtering. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2019, vol. 29, pp. 1397–1412. doi: 10.1109/TIP.2019.2941326
31. Hassan M. A., Yang M., Rasheed A., Yang G., Reynolds M., Xia X., Xiao Y., He Z. A Rapid Monitoring of NDVI across the Wheat Growth Cycle for Grain Yield Prediction Using a Multi-Spectral UAV Platform. *Plant science*. 2019, vol. 282, pp. 95–103. doi: 10.1016/j.plantsci.2018.10.022
32. Copernicus Open Access Hub. Available at: <https://scihub.copernicus.eu> (accessed 10.07.2023).
33. Earthdata. Available at: <https://www.earthdata.nasa.gov> (accessed 10.07.2023).
34. Jaramillo D., Nguyen D. V., Smart R. Leveraging Microservices Architecture by Using Docker Technology. *SoutheastCon 2016. IEEE*, 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/SECON.2016.7506647
35. Requests: HTTP for Humans™. Available at: <https://requests.readthedocs.io/> (accessed 10.07.2023).
36. Qin C. Z., Zhan L. J., Zhu A. X. How to Apply the Geospatial Data Abstraction Library (GDAL) Properly to Parallel Geospatial Raster I/O? *Transactions in GIS*. 2014, vol. 18, iss. 6, pp. 950–957. doi: 10.1111/tgis.12068
37. pallets/flask: The Python micro framework for building web applications. GitHub. Available at: <https://github.com/pallets/flask> (accessed 10.07.2023).
38. Jose B., Abraham S. Exploring the Merits of Nosql: A Study Based on Mongoddb. *2017 Intern. Conf. on Networks & Advances in Computational Technologies (NetACT)*. Thiruvananthapuram, India. 20–22 July 2017. IEEE, 2017, p. 266–271. doi: 10.1109/NETACT.2017.8076778

Information about the authors

Mark M. Zaslavskiy – Cand. Sci. (2019), Deputy Head of the Department of Software Engineering and Computer Applications of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 15 scientific publications. Area of expertise: spatial markup; artificial intelligence; machine vision; audio processing; automation of evaluation of educational works.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: mark.zaslavskiy@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9084-3604>

Kirill E. Kryzhanovskiy – Master in "Software engineering" of Saint Petersburg Electrotechnical University, Junior Software developer of Yandex. Area of expertise: artificial intelligence; computer vision; orientation and navigation algorithms; unmanned aerial vehicles.

Address: Yandex LLC, 16, Lev Tolstoy St., Moscow 119021, Russian Federation

E-mail: kirill.lfybk.rh@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2246-8929>

Dmitry V. Ivanov – Postgraduate student in "Computer Science and Informatics", assistant of the Department of Software Engineering and Computer Applications of Saint Petersburg Electrotechnical University. Author of 3 scientific publications. Area of expertise: drone swarms; spatial markup; artificial intelligence; machine vision.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: dmitry.ivanov@moevm.info

<https://orcid.org/0009-0005-8731-118X>

Волноводно-щелевая антенна на основе SIW-волновода

В. Г. Кошкидько[✉], Я. О. Гальцов, Д. А. Портных

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

[✉] kvg59@mail.ru

Аннотация

Введение. Волноводно-щелевые антенны широко применяются в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн из-за множества достоинств, среди которых высокие направленные свойства, компактные размеры, плоская форма, удобство подведения питания и высокая эффективность. Вместе с этим наблюдается стремление к уменьшению размеров СВЧ-устройств, их миниатюризации и повышению степени интеграции. Одним из вариантов решения этой задачи является переход к устройствам на основе волноводов, интегрированных в подложку (Substrate Integrated Waveguide – SIW).

Цель работы. Разработка модели волноводно-щелевой антенны, построенной на основе SIW-волновода, с характеристиками, аналогичными антенне, выполненной по традиционной технологии на основе полого металлического волновода.

Материалы и методы. Построение модели исследуемой структуры, электромагнитное моделирование и анализ ее направленных свойств проведены в САПР Ansys HFSS. Для определения координат продольных щелей на широкой стенке SIW-волновода использован энергетический метод. Для автоматизации операций по созданию и удалению однотипных объектов при построении модели разработаны макросы на языке Visual Basic Scripting Edition. Для печатного исполнения SIW-волновода использован СВЧ-материал Arlon AD300C. Проектирование антенны на основе SIW-волновода выполнялось поэтапно: сначала была разработана эталонная модель на основе полого металлического волновода, затем переходная модель на основе волновода, полностью заполненного диэлектриком, и итоговая модель на основе SIW.

Результаты. На каждом этапе контролировалась диаграмма направленности. В итоге смоделирована антенна на основе SIW-волновода с направленными свойствами, полностью совпадающими со свойствами антенны на основе эталонного полого металлического волновода.

Заключение. На основе моделирования в САПР Ansys HFSS разработана и протестирована волноводно-щелевая антенна на основе SIW-волновода с требуемыми характеристиками. Антенна позволит использовать одно из главных преимуществ SIW-технологии – возможность интегрировать все компоненты на одной подложке, включая антенны, пассивные компоненты и активные элементы, что неизбежно приведет к уменьшению размеров СВЧ-устройств и их миниатюризации.

Ключевые слова: волноводно-щелевая антенна, SIW, моделирование, САПР, HFSS

Для цитирования: Кошкидько В. Г., Гальцов Я. О., Портных Д. А. Волноводно-щелевая антенна на основе SIW-волновода // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 70–80. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-70-80

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 03.03.2023; принята к публикации после рецензирования 25.05.2023; опубликована онлайн 28.09.2023

A Substrate Integrated Waveguide Slotted Antenna

Vladimir G. Koshkid'ko[✉], Yaroslav O. Galtsov, Dmitry A. Portnykh

Southern Federal University, Rostov-on-don, Russia

✉ kvg59@mail.ru

Abstract

Introduction. Slotted waveguide antenna arrays are widely used across centimeter- and millimeter-wavelength ranges due to numerous advantages, including their good directional properties, compact dimensions, flat shape, convenience of power supply, and high efficiency. At the same time, the current trend toward miniaturization of electronic devices and their integration requires new solutions, such as the development of devices based on waveguides integrated into the substrate (Substrate Integrated Waveguide – SIW).

Aim. To simulate a SIW-based slotted antenna with characteristics similar to those of a conventional antenna array based on a hollow metal waveguide.

Materials and methods. The Ansys HFSS software was used to simulate the structure under study and to carry out electromagnetic modeling and analysis of its directional properties. The energy method was used to determine the coordinates of longitudinal slots on the wide wall of the SIW waveguide. Macros were developed in the Visual Basic Scripting Edition language to automate routine operations for creating and deleting objects of the same type when constructing a model. The Arlon AD300C microwave material was used to manufacture a printed version of the SIW waveguide.

Results. The process of developing a SIW slotted antenna was carried out in the following stages: construction of a reference model based on a hollow metal waveguide followed by creating a transition model based on a waveguide completely filled with a dielectric and the final SIW-based model. At each stage, the radiation pattern was monitored to obtain the directional properties of the SIW slotted antenna with characteristics identical to those of an antenna based on the reference hollow metal waveguide.

Conclusion. A SIW slotted antenna with the required characteristics was simulated and tested in the Ansys HFSS environment. Such an antenna employs one of the main advantages of the SIW technology, i.e., the possibility of integrating all components on a single substrate, including antenna arrays, passive components, and active elements. This approach provides the basis for reducing the size of microwave devices and their miniaturization.

Keywords: waveguide slotted antenna, SIW, modeling, CAD, HFSS

For citation: Koshkid'ko V. G., Galtsov Ya. O., Portnykh D. A. A Substrate Integrated Waveguide Slotted Antenna. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 70–80. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-70-80

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 03.03.2023; accepted 25.05.2023; published online 28.09.2023

Введение. Волноводно-щелевые антенны (ВЩА) много лет остаются одним из основных типов антенн для систем радиолокации. Их преимуществами являются отличные направленные свойства, позволяющие получить диаграмму направленности (ДН) с необходимыми параметрами, простая схема возбуждения, малые габариты и масса, простая форма без лишних выступов, высокая эффективность.

Обычно ВЩА изготавливаются на основе полноразмерных полых металлических волноводов и применяются в основном в системах радиолокации. При использовании их в качестве бортовых устройств наиболее остро стоит проблема

уменьшения габаритов и массы, миниатюризации и повышения степени их интегрирования.

Одним из вариантов решения этой задачи является переход к устройствам на основе волноводов, интегрированных в подложку (Substrate Integrated Waveguide – SIW). SIW-технология позволяет интегрировать все компоненты на одной подложке, включая антенны, пассивные компоненты и активные элементы, что неизбежно приведет к уменьшению размеров СВЧ-устройств и их миниатюризации [1].

Постановка задачи. Необходимо спроектировать SIW ВЩА со следующими параметрами:

– рабочая частота $f_0 = 10$ ГГц;

- ширина главного лепестка ДН в Н-плоскости $2\theta_{0.5}^H = 3^\circ$;
- уровень боковых лепестков (УБЛ) в Н-плоскости -20 дБ;
- максимум ДН направлен перпендикулярно оси ВЩА ($\theta_{\max} = 90^\circ$);
- поляризация – вертикальная.

На проектируемую ВЩА накладываются дополнительные условия:

1) SIW-волновод должен иметь частотный диапазон, совпадающий с диапазоном полого металлического волновода стандартного сечения 23×10 мм;

2) для печатного исполнения SIW-волновода необходимо использовать СВЧ-материал Arlon AD300C с толщиной подложки $h = 1.524$ мм, имеющий относительную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon = 2.97$.

Антенна на основе SIW-волновода проектировалась поэтапно: сначала разрабатывалась эталонная модель на основе полого металлического волновода, затем переходная модель на основе волновода, полностью заполненного диэлектриком, и итоговая модель на основе SIW.

Эталонная модель волноводно-щелевой антенны на основе полого волновода. Эталонная модель необходима для сравнения полученных на последующих этапах проектирования результатов с параметрами этой модели как с эталонными.

Эталонная модель построена на основе полого металлического волновода с идеально проводящими стенками стандартного сечения с размерами $a \times b = 23 \times 10$ мм².

С одной стороны волновод возбуждается

волноводным портом с основным типом волны H_{10} , расположенным на расстоянии $\lambda_B/4$ от центра первой щели, а с другой – закорочен металлизированным короткозамыкателем, расположенным на расстоянии $\lambda_B/4$ от центра последней щели (рис. 1).

Длина волны в волноводе

$$\lambda_B = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - [\lambda_0/(2a)]^2}} = 39.57 \text{ мм},$$

где $\lambda_0 = c/f_0 = 30$ мм – длина волны в свободном пространстве для заданной частоты.

Для обеспечения вертикальной поляризации излучаемого поля щели длиной $l_{щ} = \lambda_0/2$ расположены продольно на широкой стенке волновода в шахматном порядке. Для получения направления излучения по нормали к широкой стенке волновода ($\theta_{\max} = 90^\circ$) щели размещены с шагом $d_{щ} = \lambda_B/2$, что обеспечивает их синфазное возбуждение.

Необходимый уровень бокового излучения обеспечивает распределение поля $f(z)$ вида "косинус в квадрате на пьедестале" [2]. Требуемое распределение поля $f(z)$ реализуется за счет смещения щелей на расстояния x_n от средней линии широкой стенки волновода.

Количество щелей N , необходимое для обеспечения заданной ширины ДН в Н-плоскости, определяется из приближенной формулы [3]

$$2\theta_{0.5}^H = \frac{57.4\lambda_0}{Nd}. \quad (1)$$

С учетом заявленных параметров из (1) по-

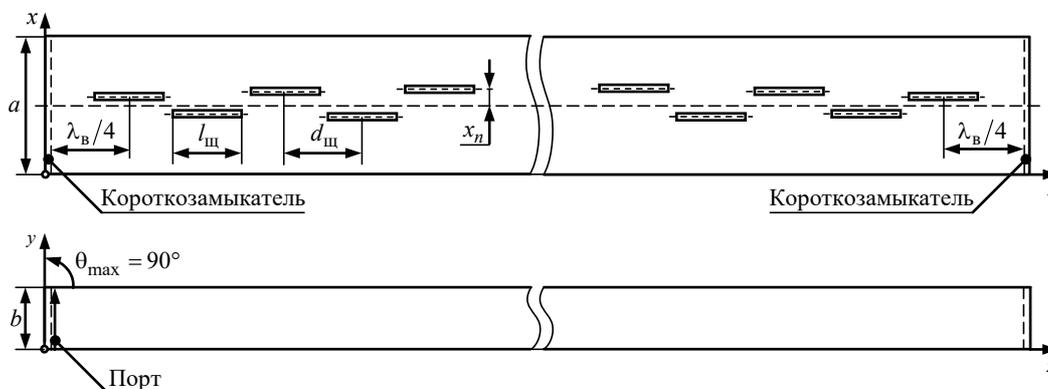


Рис. 1. Эталонная модель ВЩА на основе полого прямоугольного волновода

Fig. 1. Reference Model of the Waveguide Slotted Antenna based on a Hollow Rectangular Waveguide

лучим необходимое число щелей $N = 29$.

Для определения координат продольных щелей на широкой стенке волновода использован энергетический метод, теория которого изложена в [2], а практическое применение к проектированию ВЦА на основе полого металлического волновода описано в [3–5].

При возбуждении с одного из концов нормированная входная проводимость ВЦА $g_{вх} = 1$, а эквивалентная нормированная проводимость n -й щели определяется по формуле [2]

$$g_n = g_{вх} \frac{f^2(z_n)}{\sum_{m=1}^N f^2(z_m)}, \quad (2)$$

где $n = 1 \dots N$ – номер щели.

Каждая щель может быть построена по двум координатам: x_n – сдвигу относительно средней линии и z_n – отступу от короткозамыкателя.

Сдвиг n -й щели относительно средней линии широкой стенки волновода рассчитывается по формуле [4, 6]

$$x_n = \frac{a}{\pi} \arcsin \sqrt{\frac{g_n}{2.09 \frac{a \lambda_B}{b \lambda} \cos\left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_B}\right)^2}}. \quad (3)$$

Положение центра n -й щели вдоль оси z относительно короткозамыкателя может быть определено как

$$z_n = (2n - 1)(\lambda_B/4). \quad (4)$$

Координаты щелей x_n , z_n рассчитывались в пакете компьютерной алгебры Mathcad с использованием (3) и (4). Полученные массивы координат щелей x_n , z_n из Mathcad экспортированы в текстовые файлы, а из этих промежуточных файлов импортированы в интегрированный графический редактор Ansys HFSS 3D Modeler с помощью макроса на языке VBScript. После этого был использован макрос [4], позволяющий в автоматическом режиме "вырезать" поочередно все щели на широкой стенке прямоугольного волновода по заданным координатам.

Полученная в результате моделирования

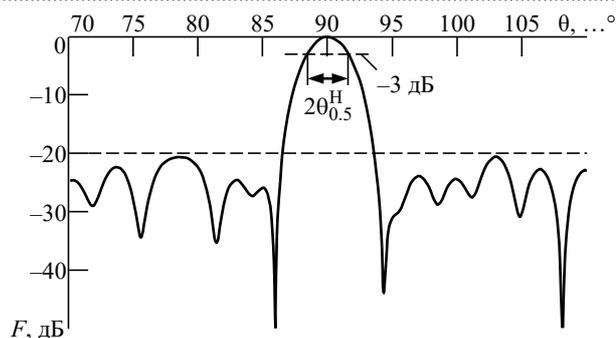


Рис. 2. Диаграмма направленности ВЦА на основе полого волновода в H-плоскости

Fig. 2. Radiation Pattern of the Waveguide Slotted Antenna based on a Hollow Waveguide in the H-plane

ДН ВЦА в H-плоскости $F(\theta)$ представлена на рис. 2 (штриховыми линиями обозначены заданный УБЛ (-20 дБ) и уровень для определения ширины главного лепестка по половинной мощности $\theta_{0.5}^H$ (-3 дБ)). Из графика видно, что требованиям технического задания удовлетворяет как полученный УБЛ (не превышает заданный уровень -20 дБ), так и ширина главного лепестка по половинной мощности $2\theta_{0.5}^H = 91.56 - 88.4 = 3.16^\circ$. Эта ДН принята за эталонную для сравнения с ней ДН, полученных на последующих этапах.

Модель волноводно-щелевой антенны, построенной на основе волновода, полностью заполненного диэлектриком. В задании на проектирование указано, что для печатного исполнения SIW-волновода необходимо использовать СВЧ-материал Arlon AD300C, имеющий $\epsilon = 2.97$ и толщину подложки $h = 1.524$ мм. Поэтому для исследования влияния диэлектрического заполнения на параметры антенны разработана промежуточная модель на основе волновода, полностью заполненного диэлектриком.

При переходе от полого прямоугольного волновода (рис. 3, а) к волноводу с диэлектрическим заполнением (рис. 3, б) необходимо выбрать размеры волновода, заполненного диэлектриком, так, чтобы диапазон рабочих частот остался неизменным. Высоту полого прямоугольного волновода b можно заменить на толщину подложки h , поскольку размер узкой стенки волновода не влияет на распространение основного типа волны H_{10} . Напротив, от

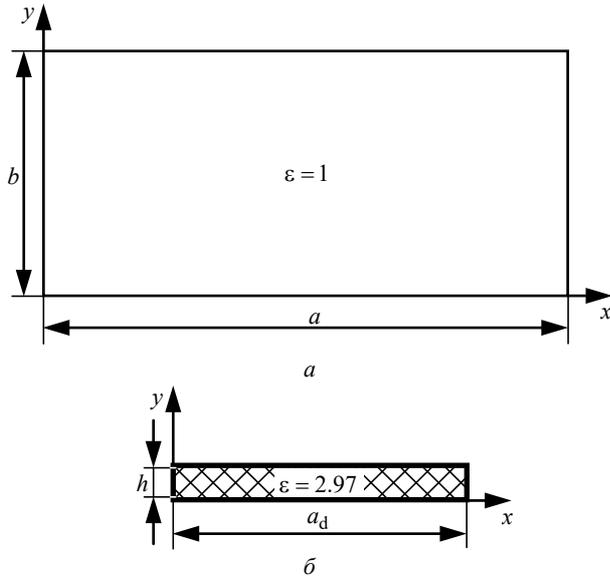


Рис. 3. Поперечное сечение полого эталонного прямоугольного волновода (а) и прямоугольного волновода, полностью заполненного диэлектриком (б)
 Fig. 3. Cross Section of the Hollow Reference Rectangular Waveguide (a) and the Rectangular Waveguide Completely Filled with a Dielectric (б)

размера широкой стенки волновода a_d диапазон рабочих частот зависит, поэтому для сохранения его неизменным по сравнению с полым прямоугольным волноводом необходимо, чтобы выполнялось условие

$$a_d = a/\sqrt{\epsilon}. \quad (5)$$

Для заданных параметров $a_d = 13.346$ мм. От этого размера зависит длина волны в волноводе:

$$\lambda_B = \frac{\lambda_\epsilon}{\sqrt{1 - [\lambda_\epsilon / (2a_d)]^2}}, \quad (6)$$

где $\lambda_\epsilon = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon}$ – длина волны в диэлектрике.

Таким образом диэлектрическое заполнение волновода приводит к уменьшению размера его широкой стенки с 23 до 13.346 мм, что влечет за собой уменьшение длины волны в волноводе с 39.57 до 22.96 мм.

Уменьшение длины волны в волноводе по сравнению с полым прямоугольным волноводом приводит к уменьшению шага между щелями:

$$d_{щ} = \lambda_B / 2 = 11.48 \text{ мм}, \quad (7)$$

что вызывает увеличение их количества:

$$N = \frac{57.4\lambda_0}{20_{0.5}^H d_{щ}} = 51. \quad (8)$$

Длина щелей на стенке волновода, полностью заполненного диэлектриком, связана с длиной волны в свободном пространстве λ_0 и относительной диэлектрической проницаемостью подложки ϵ соотношением [7]

$$l_{щ} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{2(\epsilon + 1)}}. \quad (9)$$

В модели заполненного диэлектриком волновода короткозамыкатели и возбуждение приняты аналогичными этим элементам полого волновода. В связи с изменением размеров заново определены координаты щелей (2)–(4) с подстановкой в (3) вместо значений a и b значений a_d и h соответственно. Параметры щелей волновода определены по (5)–(9). Как и для полого волновода, для размещения в модели волновода щелей на широкой стенке был использован скрипт, разработанный ранее [4]. Полученная модель аналогична модели ВЦА на основе полого прямоугольного волновода (см. рис. 1); отличие состоит в наличии диэлектрического заполнения (рис. 3, б) и в том, что параметры этой модели рассчитываются по (5)–(9).

В результате моделирования в САПР Ansys HFSS получена ДН заполненного диэлектриком волновода в Н-плоскости (рис. 4). Полученная ДН, как и ДН полого волновода, в области боковых лепестков не превышает уровней, установленных техническим заданием (–20 дБ). Требованиям технического задания удовлетворяет также и ширина главного ле-

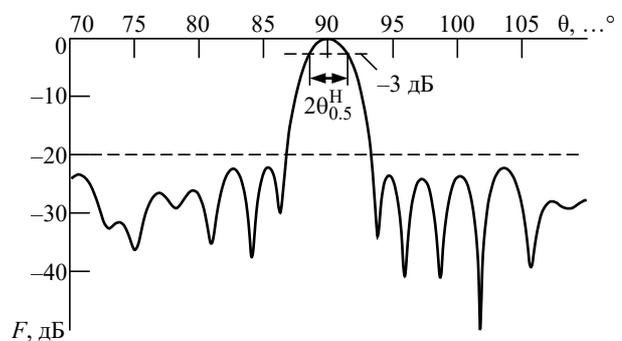


Рис. 4. Диаграмма направленности модели ВЦА на основе заполненного диэлектриком волновода в Н-плоскости

Fig. 4. Radiation Pattern of the Simulated Waveguide Slotted Antenna based on a Dielectric-Filled Waveguide in the H-plane

пестка по половинной мощности $2\theta_{0.5}^H = 91.52 - 88.52 = 3.0^\circ$.

Модель волноводно-щелевой антенны, построенной на основе SIW-технологии. Прямоугольный волновод в неизменном виде не может быть интегрирован в печатную плату, поскольку технологически невозможно внедрить в диэлектрическую подложку сплошные металлические боковые стенки. В SIW-волноводе эти стенки могут быть реализованы путем плотного размещения рядов металлических штырей или металлизированных сквозных отверстий, соединяющих верхнюю и нижнюю металлические пластины подложки. Конфигурация применяемой SIW-структуры представлена на рис. 5.

При формировании модели SIW-волновода его ширина w (расстояние между центрами рядов металлизированных отверстий по оси x) не может быть использована непосредственно из-за усложнения структуры электромагнитного поля в области переходных отверстий, вызванного круглой формой, электрической проводимостью боковых стенок отверстий или штырей и наличием промежутков между ними. Поэтому, чтобы применить теорию волноводов к SIW, в расчетах используется не ширина волновода w , а его эффективная ширина $w_{эф}$ (рис. 5).

Замена сплошных стенок прямоугольного волновода на периодические металлизированные межслойные отверстия ведет к тому, что виртуальные боковые стенки SIW-волновода будут располагаться не по оси расположения межслойных отверстий, а несколько сдвинуты внутрь по оси x . Расстояние между виртуальными боковыми стенками равно эффективной ширине $w_{эф}$.

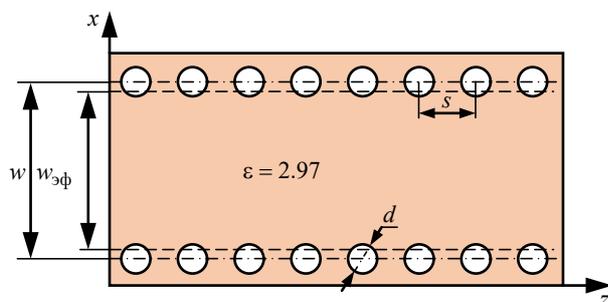


Рис. 5. Конфигурация моделируемой SIW-структуры

Fig. 5. Configuration of the Simulated SIW Structure

Для того чтобы SIW-волновод имел такой же частотный диапазон, как и эквивалентный прямоугольный волновод, необходимо принять $w_{эф} = a_d$ (5).

Расстояние по оси z между центрами отверстий равно s , а их диаметр – d .

Отношение диаметра межслойных металлизированных отверстий d к ширине волновода w определяет потери в SIW, поэтому рекомендуется выбирать $d/w < 0.2$ [8]. Кроме этого одновременно должно выполняться условие $d < 0.2\lambda_v$ [8].

Соотношение s/d влияет на долю "вытекающего" из SIW поля, в связи с чем это соотношение рекомендуется принимать как $s/d < 2$ [8].

Таким образом, имея выбранные значения геометрических размеров s , d и рассчитанное значение $w_{эф}$, для построения модели необходимо знать ширину SIW-волновода.

Существует несколько формул, связывающих значения w и $w_{эф}$, дающих разную точность.

Наиболее простая формула [9] дает точность в пределах $\pm 5\%$:

$$w = w_{эф} + d^2 / (0.95s). \quad (10)$$

Более точная формула [9]

$$w_{эф} = w - 1.08d^2/s + 0.1d^2/w. \quad (11)$$

Наиболее точные результаты (в пределах $\pm 1\%$), как показано в [10], дает выражение

$$w_{эф} = w \left(\xi_1 + \frac{\xi_2}{\frac{s}{d} + \frac{\xi_1 + \xi_2 - \xi_3}{\xi_3 - \xi_1}} \right), \quad (12)$$

где

$$\xi_1 = 1.0198 + \frac{0.3465}{w/s - 1.0684};$$

$$\xi_2 = -0.1183 - \frac{1.2729}{w/s - 1.2010};$$

$$\xi_3 = 1.0082 - \frac{0.9163}{w/s + 0.2152}.$$

Ширина SIW-волновода w определяется решением уравнений (11) и (12) относительно этой переменной.

При использовании (10) и (11) неточность вычисления значения w приводила к отклонению максимума излучения на $0.5...1^\circ$, что при заданной ширине ДН в 3° является существенной погрешностью. Поэтому для определения ширины SIW-волновода w использована (12), как дающая наиболее высокую точность вычисления.

В отличие от двух ранее рассмотренных моделей в модели ВЩА на основе SIW использовано возбуждение не с помощью волноводного порта с основным типом волны H_{10} , а с помощью реальной линии питания. Из-за удобства реализации ВЩА на печатной плате вместе с остальными СВЧ-узлами наиболее подходящим способом подачи энергии выступает микрополосковая линия (МПЛ) с сопротивлением 50 Ом . Для согласования большой разницы между шириной SIW-волновода w и шириной линии передачи обычно используются специальные переходы.

Наиболее подходящим для рассматриваемой модели является конусообразный микрополосковый переход [11], достоинством которого в отличие от аналогичных относительно дорогостоящих объемных компонентов является возможность изготовления на одной подложке с рассматриваемым SIW-волноводом.

Микрополосковый переход (рис. 6) состоит из конусообразного четвертьволнового трансформатора длиной L_t , который узкой стороной подсоединен к прямоугольной МПЛ шириной w_L , а широкой стороной, имеющей размер W_t , подключается непосредственно к верхней металлической стенке SIW.

Длина L_t микрополоскового перехода определяется соотношением [12]

$$L_t = n\lambda_\varepsilon/4. \quad (13)$$

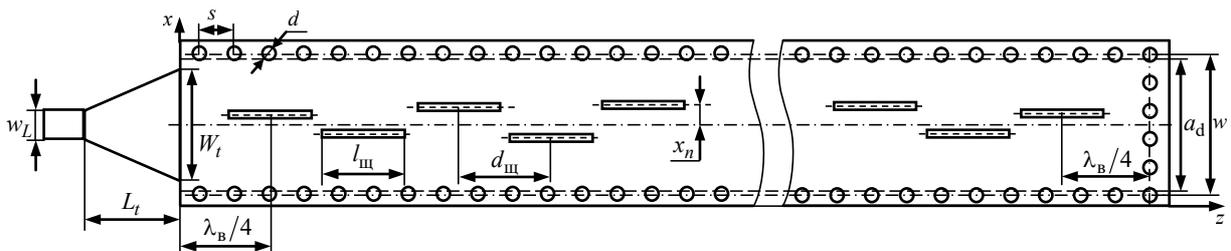


Рис. 7. Модель ВЩА на основе SIW-волновода

Fig. 7. Simulated Waveguide Slotted Antenna

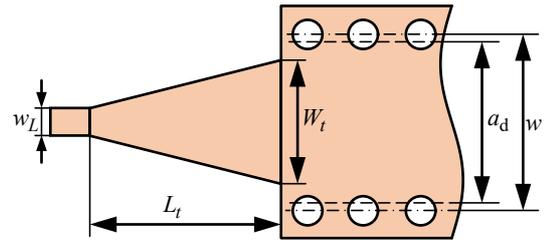


Рис. 6. Конусообразный микрополосковый переход

Fig. 6. Tapered Microstrip Junction

Ширина МПЛ с сопротивлением 50 Ом находится как формула [13]

$$w_L = \frac{h}{r} - \frac{2h}{\pi} \left[\ln \left(\frac{\pi}{r} - 2 \ln 2 \right) + 1 \right] = 3.258 \text{ мм}, \quad (14)$$

где $r = 50\sqrt{\varepsilon}/(120\pi)$.

Простота структуры микрополоскового перехода позволяет определить оптимальные ширину и длину конусообразного трансформатора для согласования импедансов SIW и МПЛ в процессе моделирования. Известно аналитическое выражение, позволяющее определить ширину трансформатора в месте его подсоединения к SIW в зависимости от диэлектрической проницаемости подложки ε и толщины h [14, 15]:

$$W_t = \frac{1}{\frac{4.38}{a_d} \exp \left(-0.627 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_e} \right)}, \quad (15)$$

где $\varepsilon_e = \frac{\varepsilon}{\frac{\varepsilon+1}{2} + \frac{\varepsilon-1}{2} \frac{1}{\sqrt{1+12h/w_L}}}$.

Модель ВЩА на основе SIW-волновода представлена на рис. 7. Для расчета параметров (эффективной ширины a_d , длины волны в волноводe λ_B , длины щелей $l_{\text{ш}}$, шага между щелями $d_{\text{ш}}$) использованы те же выражения (8)–(12), что и для модели на основе волновода, полностью заполненного диэлектриком. Как и для этого волновода в предыдущем случае, для размещения щелей на

широкой стенке волновода и построения рядов металлических штырей были использованы скрипты на языке VBScript. Для расчета размеров микрополоскового перехода (длина L_t , ширина МПЛ w_L , ширина трансформатора W_t) использованы выражения (13)–(15).

В результате моделирования в САПР Ansys HFSS получена ДН в H-плоскости SIW-волновода (рис. 8). ДН удовлетворяет требованиям технического задания по ширине главного лепестка по половинной мощности $2\theta_{0.5}^H = 91.5 - 88.48 = 3.02^\circ$ и по УБЛ (-20 дБ).

Необходимо отметить, что конструкция антенны является симметричной: щели расположены симметрично относительно середины длинной стороны, а короткозамыкатели установлены одинаково слева и справа. В связи с этим следует ожидать, что ДН будут симметричны относительно угла максимума 90° . Однако ДН на рис. 2, 4 и 8 демонстрируют существенную разницу в области боковых лепестков слева и справа от этого угла.

Объясняется эта несимметричность двумя причинами. Во-первых, питание к антенне подводится несимметрично: с одного из концов волновода. В результате щели, попарно симметричные относительно середины антенны, оказываются на разном расстоянии от точки питания, что определяет разные условия их возбуждения за счет амплитудно-фазового распределения поля по полотну антенны. Во-вторых, координаты расположения щелей рассчитаны приближенным энергетическим методом, который не учитывает их взаимного влияния, от которого также зависит точность вос-

произведения заданного распределения поля, определяющего вид ДН и ее симметричность.

Следует учесть, что указанная несимметричность наблюдается на уровнях менее -20 дБ, которые для технического задания на разработку антенны являются нерабочими. Добиваться симметричности ДН на этих уровнях вряд ли целесообразно, поскольку главные требования технического задания по УБЛ и ширине ДН выполнены.

На заключительном этапе моделирования исследовано влияние на ДН технологических погрешностей при изготовлении антенны. Объектом исследования выбрана погрешность изготовления ширины SIW-волновода w (расстояние между центрами рядов металлизированных отверстий) в пределах позиционного допуска на отклонение осей отверстий. Выбор этого параметра связан с тем, что от ширины SIW-волновода w напрямую зависит эффективная ширина $w_{эф}$, которая влияет на длину волны в волноводе λ_B .

Согласно ГОСТ Р 53429–2009 при типовых для СВЧ-устройств классах точности 4 и 5 допуск на отклонение осей отверстий составляет от 0.05 до 0.1 мм в зависимости от размеров платы. Поскольку расчетное значение ширины SIW-волновода, полученное по (12), составляет $w = 14.01$ мм, расчет ДН был выполнен для $w = 14.01 + 0.05$ мм и $w = 14.01 + 0.1$ мм.

Результаты моделирования показаны на рис. 9. Из них следует, что при расчетном значении ширины SIW-волновода $w = 14.01$ мм максимум ДН направлен перпендикулярно оси ВЩА ($\theta_{max} = 90^\circ$). При отклонении ширины SIW-волновода w на 0.05 мм максимум ДН

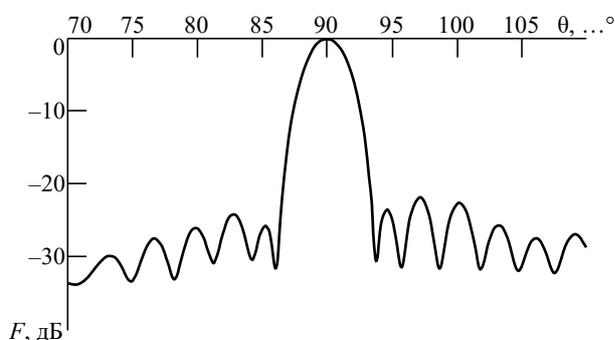


Рис. 8. Диаграмма направленности ВЩА на основе SIW-волновода в H-плоскости

Fig. 8. Radiation Pattern of the Simulated Waveguide Slotted Antenna in the H-plane

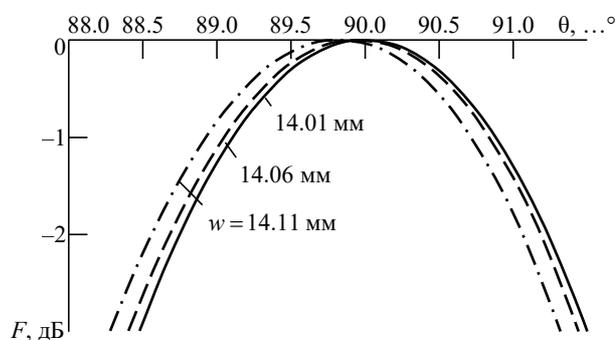


Рис. 9. Смещение максимума ДН SIW-волновода в H-плоскости при изменении его ширины

Fig. 9. Shift of the Maximum of the SIW-waveguide Radiation Pattern in the H-plane with a Change in its Width

смещается на 0.05° ($\theta_{\max} = 89.95^\circ$), а при отклонении на 0.1 мм – на 0.17° ($\theta_{\max} = 89.83^\circ$). Несмотря на то что полученные смещения максимума ДН не являются значительными, их необходимо учитывать при наличии жестких требований на изменения этого параметра.

Заключение. Целью представленной в настоящей статье работы была разработка ВЩА на основе SIW-волновода, направленные свойства и частотный диапазон которого не должны отличаться от аналогичных характеристик антенны на основе полого прямоугольного волновода стандартного сечения. Сравнение ДН антенны на основе SIW-волновода с ДН указанной антенны (рис. 10) подтверждает идентичность характеристик этих антенн в направлении максимума излучения, а УБЛ для обеих моделей соответствует техническому заданию и не превышает -20 дБ.

Таким образом, разработанная и протестированная на основе моделирования в САПР

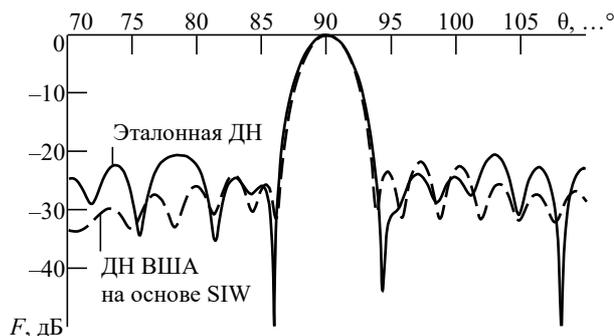


Рис. 10. Сравнение ДН в H-плоскости ВЩА на основе SIW и эталонной ВЩА

Fig. 10. Comparison of the Radiation Patterns of the SIW-based Slotted Antenna and the Reference Waveguide Slotted Antenna in the H-plane

Anslys HFSS ВЩА на основе SIW-волновода полностью удовлетворяет требованиям технического задания. Такая антенна позволит использовать одно из главных преимуществ SIW-технологии – возможность интегрировать все компоненты на одной подложке, включая антенны, пассивные компоненты и активные элементы, что неизбежно приведет к уменьшению размеров СВЧ-устройств и их миниатюризации.

Список литературы

1. Kurudere S., Erturk V. B. Design of substrate integrated waveguide based bandpass filters and power dividers: Master's Thesis / The Department of Electrical and Electronics Engineering and the Graduate School of Engineering and Science of Bilkent University. Ankara, 2013. 110 p. URL: <http://hdl.handle.net/11693/15873> (дата обращения 03.03.23)
2. Воскресенский Д. И. Антенны и устройства СВЧ. Расчет и проектирование антенных решеток и их излучающих элементов. М.: Сов. радио, 1972. 320 с.
3. Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Исследование частотной зависимости диаграммы направленности резонансной волноводно-щелевой антенной решетки, состоящей из подрешеток, в САПР Ansys HFSS // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 4. С. 15–24. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-15-24
4. Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Применение макросов языка VBScript при моделировании волноводно-щелевых антенн в САПР Ansys HFSS // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 1. С. 6–17. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-6-17
5. Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Разработка линейной эквивалентной волноводно-щелевой антенной решетки и анализ ее направленных свойств // Антенны. 2018. № 2. С. 15–20.
6. Семенихин А. И., Кошкидько В. Г., Климов А. В. Проектирование зеркальных антенн с помощью пакета Mathcad. Таганрог: Изд-во Южного федерального ун-та, 2016. 80 с.
7. Moitra S., Mukhopadhyay A. K., Bhattacharjee A. K. Ku-Band Substrate Integrated Waveguide (SIW) Slot Array Antenna for Next Generation Networks // Global J. of Computer Science and Technology. 2013. Vol. 13, № 5. P. 11–16.
8. Deslandes D., Wu Ke. Single-Substrate Integration Technique of Planar Circuits and Waveguide Filters // IEEE Trans. on microwave theory and techniques. 2003. Vol. MTT-51, iss. 2. P. 593–596. doi: 10.1109/TMTT.2002.807820
9. Xu F., Wu K. Guided-Wave and Leakage Characteristics of Substrate Integrated Waveguide // IEEE Trans. on microwave theory and techniques. 2005. Vol. MTT-53, iss. 1. P. 66–73. doi: 10.1109/TMTT.2004.839303
10. Simulation and experiment on SIW slot array antennas / L. Yan, W. Hong, G. Hua, J. Chen, K. Wu, T. J. Cui // IEEE Microwave and Wireless Components Lett. 2004. Vol. 14, iss. 9. P. 446–448. doi: 10.1109/lmwc.2004.832081
11. Deslandes D. Design equations for tapered microstrip-to-Substrate Integrated Waveguide transitions // 2010 IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Anaheim, USA, 23–28 May 2010. P. 704–707. doi: 10.1109/MWSYM.2010.5517884
12. Logarithmic Slots Antennas Using Substrate Integrated Waveguide / J. Kachhia, A. Patel, A. Vala, R. Patel, K. Mahant // Intern. J. of Microwave Science and Technology. 2015. № 2. Article ID 629797. doi: 10.1155/2015/629797

13. Hilberg W. Strengere berechnung des wellenwiderstandes von parallelen streifenleitungen und lin vergleich mit naherungen // AEÜ. 1971. Bt. 54, № 4. P. 200–205.

14. Djerafi T., Doghri A., Wu K. Substrate Integrated Waveguide Antennas // Handbook of Antenna Technologies. Ed. by Z. Chen. Springer Science+Business

Media Singapore, 2015. 60 p. doi: 10.1007/978-981-4560-75-7_57-1

15. Останков А. В., Хрипунов Е. Г. Рупорная SIW-антенна со специальным копланарным переходом и диэлектрической линзой для питания планарной антенны вытекающей волны // Радиостроение. 2020. № 2. С. 1–26. doi: 10.36027/rdeng.0220.0000163

Информация об авторах

Кошкидько Владимир Георгиевич – кандидат технических наук (1988), доцент (1993) кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (Таганрог). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – исследования в области электромагнетизма и прикладной электродинамики (рассеяние электромагнитных волн импедансными структурами; импедансные, щелевые и микрополосковые электродинамические структуры; микрополосковые антенны; антенны с реактивными нагрузками).

Адрес: Южный федеральный университет, ул. Б. Садовая, д. 105/42, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

E-mail: kvg59@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-1119-5117>

Гальцов Ярослав Олегович – бакалавр наук (2022), магистрант кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (Таганрог). Сфера научных интересов – исследование антенных структур и иных устройств в интегральном исполнении; способы миниатюризации систем.

Адрес: Южный федеральный университет, ул. Б. Садовая, д. 105/42, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

E-mail: galcov-111yaroslav@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0195-7547>

Портных Дмитрий Александрович – бакалавр наук (2021), магистрант кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (Таганрог). Сфера научных интересов – исследование многослойных СВЧ-структур; интегрированные в подложку волноводы; многоэлементные антенные решетки.

Адрес: Южный федеральный университет, ул. Б. Садовая, д. 105/42, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

E-mail: portnuhd@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0460-6248>

References

1. Kurudere Sinan, Erturk Vakur B. Design of Substrate Integrated Waveguide Based Bandpass Filters and Power Dividers. Ankara, The Department of Electrical and Electronics Engineering and the Graduate School of Engineering and Science of Bilkent University, 2013, 110 p. Available at: <http://hdl.handle.net/11693/15873> (accessed 03.03.23)

2. Voskresenskiy D. I. *Antenny i ustroystva SVCH. Raschet i proyektirovaniye antenykh resh-etok i ikh izluchayushchikh elementov* [Antennas and Microwave Devices. Calculation and Design of Antenna Arrays and Their Radiating Elements]. Moscow, Sovetskoye radio, 1972, p. 320. (In Russ.)

3. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Investigation of a Radiation Pattern Frequency Dependence of a Subarrayed Slotted Waveguide Antenna Using CAD Ansys HFSS. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 15–24. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-15–24 (In Russ.)

4. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Design of a Slotted Waveguide Antenna by Means of VBScript Scripting Language Macros in CAD Ansys HFSS.

Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 1, pp. 6–17. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-6-17 (In Russ.)

5. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Development of a Linear Equivalent Slotted Waveguide Antenna Array and Analysis of its Directional Properties. Journal Antennas. 2018, no. 2, pp. 15–20. (In Russ.)

6. Semenikhin A. I., Koshkid'ko V. G., Klimov A. V. *Proyektirovaniye zerkal'nykh anten s pomoshch'yu paketa Mathcad* [Designing Reflector Antennas Using the Mathcad Package], *Taganrog, Izdatel'stvo Yuzhnogo federal'nogo universiteta*, 2016, 80 p. (In Russ.)

7. Moitra S., Mukhopadhyay A. K., Bhattacharjee A. K. Ku-Band Substrate Integrated Waveguide (SIW) Slot Array Antenna for Next Generation Networks. Global Journal of Computer Science and Technology. 2013, vol. 13, no. 5, pp. 11–16.

8. Deslandes D., Wu Ke. Single-Substrate Integration Technique of Planar Circuits and Waveguide Filters. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2003, vol. 51, no. 2, pp. 593–596. doi: 10.1109/TMTT.2002.807820

9. Xu Feng, Wu Ke. Guided-Wave and Leakage Characteristics of Substrate Integrated Wave-guide. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2005, vol. 53, no. 1, pp. 66–73. doi: 10.1109/TMTT.2004.839303

10. Li Yan, Wei Hong, Guang Hua, Jixin Chen, Ke Wu, Tie Jun Cui. Simulation and Experiment on SIW Slot Array Antennas. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2004, vol. 14, pp. 446–448. doi:10.1109/Imwc.2004.832081

11. Deslandes D. Design Equations for Tapered Mi-Crostrip-to-Substrate Integrated Waveguide Transitions. 2010 IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Anaheim, USA, 23–28 May 2010, pp. 704–707. doi: 10.1109/MWSYM.2010.5517884

12. Kachhia J., Patel A., Vala A., Patel R., Mahant K. Logarithmic Slots Antennas Using Substrate Integrated

Waveguide. *Intern. J. of Microwave Science and Technology*. 2015, no. 2, article ID 629797. doi: 10.1155/2015/629797

13. Hilberg W. Strenge Berechnung Des Wellen-Widerstandes Von Parallelen Streifenleitungen Und Lin Vergleich Mit Naherungen. *AEÜ*. 1971, Bt. 54, no. 4, pp. 200–205.

14. Djerafi Tarek, Doghri Ali, Wu Ke. Substrate Integrated Waveguide Antennas. *Handbook of Antenna Technologies*. Springer Science + Business Media Singapore, 2015, pp. 1–60.

15. Ostankov A. V., Khripunov Ye. G. Horn SIW Antenna with a Special Coplanar Junction and a Dielectric Lens for Powering the Planar Antenna of the Outflow Wave. *Radiostroyeniye* [Radioengineering]. 2020, no. 2, pp. 1–26. doi: 10.36027/rdeng.0220.0000163

Information about the authors

Vladimir G. Koshkid'ko, Cand. of Sci. (Eng.) (1988), Associate Professor (1993) of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of Radio Engineering Systems and Control Institute of Southern Federal University in Taganrog, Russia. Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2008). The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: electromagnetics and applied electrodynamics; electromagnetic waves scattering by impedance structures; impedance, slot and microstrip electromagnetic structures; microstrip antennas; reactive loaded antennas.

Address: Southern Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya St., Rostov-on-don 344006, Russia

E-mail: kvg59@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-1119-5117>

Yaroslav O. Galtsov, Master's degree student of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of the Institute of Radio Engineering Systems and Management of the Southern Federal University in Taganrog, Russia. Area of expertise: research of antenna structures and other devices in integrated design; methods of miniaturization of systems.

Address: Southern Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya St., Rostov-on-don 344006, Russia

E-mail: galcov-111yaroslav@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0195-7547>

Dmitry A. Portnykh, Master of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of Institute of Radio Engineering Systems and Control of Southern Federal University in Taganrog. Area of expertise: research of multilayer microwave structures; waveguides integrated into the substrate; multi-element antenna arrays.

Address: Southern Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya St., Rostov-on-don 344006, Russia

E-mail: portnuhd@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0460-6248>

Оценка размерных показателей элементов проводящего рисунка печатных плат, полученных с помощью 3D-печати

О. Н. Смирнова , А. А. Александров, Ю. С. Боброва, К. М. Моисеев

Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

 olga.smirnova.nik@gmail.com

Аннотация

Введение. Анализ зарубежных исследовательских работ, посвященных методам 3D-печати, показывает возможность их применения для изготовления печатных плат (ПП), а также демонстрирует рост интереса в данном направлении. Одним из доступных методов является метод послойного наложения филамента, который обычно применяется для формирования подложки с каналами под проводники. На текущий момент минимальная ширина канала составляет 100 мкм, что соответствует 5-му классу точности ПП. Однако данные о способе получения подобных размеров или об уровне их отклонения от заданных номинальных значений отсутствуют.

Цель работы. Определить влияние таких производственно-технологических факторов, как диаметр экструзионного сопла (ЭС) и количество контуров, на размерные характеристики ПП (линейные размеры, ширина канала печатного проводника, расстояние между проводниками, диаметр сквозного отверстия).

Материалы и методы. Для получения линейных моделей проводится полный факторный эксперимент. Оценивается влияние материалов – полилактид (PLA), акрилонитрил бутадиен стирол (ABS) и стеклонаполненный ABS; слайсеров – Ultimaker Cura и PrusaSlicer; 3D-принтеров – Picaso 3D Designer Classic 2016 и Hercules Strong 2017; латунных ЭС диаметрами $\varnothing 0.2$ и $\varnothing 0.4$ мм. Рассматривается возможность применения латунных ЭС, покрытых химическим никелем, для печати стеклонаполненными филаментами. Исследование проводилось на производственной базе Научно-образовательного центра "Центр аддитивных технологий" при МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Результаты. Показана возможность изготовления ПП до 2-го класса точности при использовании ЭС $\varnothing 0.4$ мм и до 3-го класса точности для ЭС $\varnothing 0.2$ мм. Выявлено, что гальваническое нанесение химического никеля на латунное ЭС $\varnothing 0.2$ мм позволяет повысить его износостойкость для печати стеклонаполненными филаментами. Даны рекомендации по выбору комбинации диаметра ЭС и количества контуров.

Заключение. Анализ полученных адекватных математических моделей показывает значимость диаметра ЭС и количества контуров. Полученные результаты могут быть использованы для создания макетов ПП.

Ключевые слова: печатные платы, элементы проводящего рисунка, послойное наложение филамента, FDM-технология, 3D-печать

Для цитирования: Оценка размерных показателей элементов проводящего рисунка печатных плат, полученных с помощью 3D-печати / О. Н. Смирнова, А. А. Александров, Ю. С. Боброва, К. М. Моисеев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 81–94. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-81-94

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Выражаем признательность А. В. Павлову за идею гальванического нанесения химического никеля на латунное сопло с целью повышения износостойкости.

Статья поступила в редакцию 27.03.2023; принята к публикации после рецензирования 26.07.2023; опубликована онлайн 28.09.2023



Evaluation of Dimensional Characteristics of Conductive Pattern Elements of 3D-Printed Circuit Boards

Olga N. Smirnova[✉], Alexander A. Aleksandrov, Yulia S. Bobrova, Konstantin M. Moiseev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

[✉]olga.smirnova.nik@gmail.com

Abstract

Introduction. A review of foreign publications on 3D printing methods shows the possibility of their application for the manufacture of printed circuit boards (PCBs), while demonstrating the growth of interest in this field. One of the available methods is fused deposition modeling, which can be used to form substrates with channels for traces. At present, the minimum channel width comprises 100 μm , which corresponds to the 5th class of PCB accuracy. However, there is no data on how to obtain such dimensions or on the magnitude of their deviation from the given nominal values.

Aim. To determine the influence of such factors as nozzle diameter and the number of contours on the dimensional characteristics of PCBs (linear dimensions; trace channel width; trace spacing; via diameters).

Materials and methods. To obtain linear models, a full factorial experiment was carried out. The influence of the following materials was evaluated – polylactide (PLA), acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and glass-filled ABS; slicers – Ultimaker Cura and PrusaSlicer; 3D printers – Picaso 3D Designer Classic 2016 and Hercules Strong 2017; brass nozzle with diameters $\varnothing 0.2$ and $\varnothing 0.4$ mm. The possibility of using brass nozzles coated with chemical nickel for printing with glass-filled filaments was considered. The study was conducted using the facilities of the "Center for Additive Technologies" of Bauman Moscow State Technical University.

Results. The possibility of manufacturing PCBs up to the 2nd and 3rd accuracy classes using nozzles with a diameter of $\varnothing 0.4$ and $\varnothing 0.2$ mm, respectively, was shown. It was found that galvanic deposition of chemical nickel on a $\varnothing 0.2$ mm brass nozzle makes it possible to increase the PCB wearability when printing with glass-filled filaments. Recommendations are proposed for selecting an optimal combination of nozzle diameter and the number of contours.

Conclusion. The conducted analysis of mathematical models shows the significance of such parameters as nozzle diameter and the number of contours. The results can be used when creating new PCB layouts.

Keywords: printed circuit boards, conductive pattern elements, Fused Deposition Modeling, FDM, 3D printing

For citation: Smirnova O. N., Aleksandrov A. A., Bobrova Yu. S., Moiseev K. M. Evaluation of Dimensional Characteristics of Conductive Pattern Elements of 3D-Printed Circuit Boards. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 81–94. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-81-94

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgments. We express our gratitude to Pavlov A.V. for the idea of electroplating chemical nickel on a brass nozzle in order to increase wearability.

Submitted 27.03.2023; accepted 26.07.2023; published online 28.09.2023

Введение. Аналитические исследования, посвященные 3D-печати печатных плат (ПП), показали возможность их изготовления шестью методами: аэрозольным нанесением материала (Aerosol Jet Printing – AJP); капельным нанесением материала (Drop on Demand – DOD); многофункциональным нанесением (Multi-Functional Additive Manufacturing – MFAM); прямым нанесением материала (Direct Ink Writing – DIW); цифровым осаждением материала (Digital Material Deposi-

tion) и послойным наложением филамента (Fused Deposition Modeling – FDM) [1]. Из всех перечисленных методов последний является практически полностью импортозамещенным, в связи с чем и был выбран для рассмотрения.

Существует несколько подходов к изготовлению ПП с применением метода послойного наложения филамента (ПНФ). Данный метод используется в большинстве из них лишь для формирования подложки с каналами, которые в

дальнейшем заполняются проводящим материалом. Практически реализованные ширины каналов проводников составляют от 100 мкм [2] до 405 мкм [3], что соответствует 2–5-му классам точности (КТ) по ГОСТ Р 53429 [4]. Однако существующие зарубежные исследовательские работы по данной тематике в большинстве своем качественно оценивают работоспособность напечатанных изделий (например, горит/не горит светодиод), поэтому в данном исследовании будет отдано предпочтение описанию количественных характеристик.

Теоретические положения. Принципы печати ПНФ и особенности его применения для ПП описаны в [5], а некоторые основные параметры изображены на рис. 1.

Наиболее важными физическими процессами, влияющими на размерные показатели изделия, являются [6]:

1. Экструзия и осаждение экструдированного материала (ЭМ), а именно:

1.1. Скорость потока материала. Должна быть постоянной для предотвращения экструдирования избытка или недостатка материала (т. е. обеспечения постоянства площади поперечного сечения ЭМ). На нее влияют скорость подачи филамента, скорость перемещения экструзион-

ной головки (ЭГ) и ее траектория, управление которыми осуществляется с помощью слайсера, а также перепад давления на входе и на выходе из экструзионного сопла (ЭС), диаметр отверстия ЭС, длина ЭС и вязкость ЭМ.

1.2. Разбухание ЭМ (*англ.* die swelling), т. е. радиальное расширение ЭМ после выхода из ЭС. Зависит от свойств материала и геометрии ЭС. Неэластичные наполнители, такие, как керамические частицы [7] или углеродные волокна [8], как правило, уменьшают разбухание.

1.3. Растекание растра. Скорость процесса, окончательная форма и ширина растра будут зависеть от вязкости и относительной поверхностной энергии расплавленного филамента и поверхности рабочей платформы (РП).

2. Отверждение растра (в частности, усадка) с последующим диффузным соединением. Зависят от свойств филамента (вязкость, смачивание, поверхностное натяжение, теплопроводность, предел текучести, плотность, количество твердых частиц и др.) и температурного режима печати (температура разжижителя, рабочей камеры (РП)).

В дополнение к изложенному ЭС определяет размер и форму ЭМ [6]. В связи с тем, что обычно формовочное отверстие сопла имеет круглую форму, невозможно выполнять острые

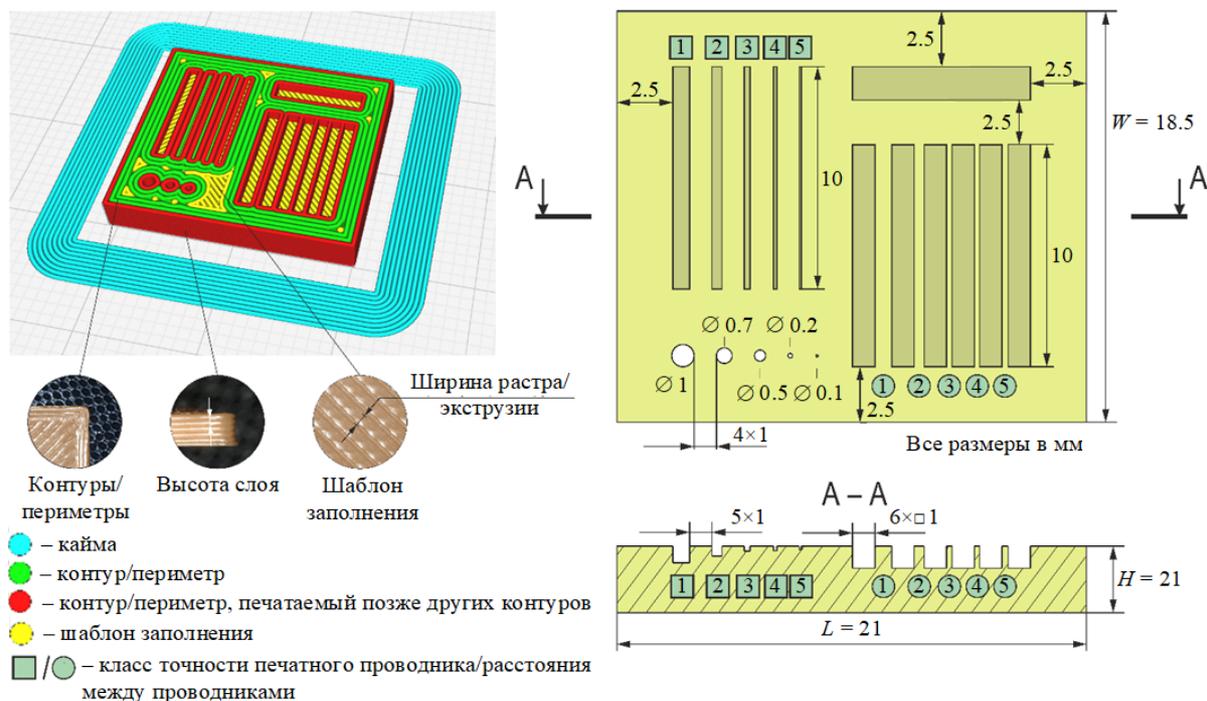


Рис. 1. Некоторые основные параметры печати (слева) и вид экспериментального образца (справа)

Fig. 1. Some FDM process parameters (left) and design of the experimental sample (right)

внешние углы, любой угол или край будет иметь закругление шириной, равной радиусу ЭС. Внутренние углы и края тоже будут закругленными. Диаметр ЭС также определяет минимальный размер элемента изделия, который может быть создан.

Кроме того, для обеспечения геометрической точности напечатанного изделия рекомендуется начинать печать с формирования контура (внешней оболочки) на более низкой скорости, чтобы сформировать границу, не позволяющую материалу, заполняющему внутреннюю часть слоя, нарушить общую точность построения изделия [6].

Таким образом, обеспечение размерных показателей достигается выбором диаметра ЭС, количества контуров, скоростей подачи филамента и перемещения ЭГ, расчетом траектории движения ЭГ, температурными режимами и свойствами филамента. При этом последние 2 параметра напрямую зависят от производителя материала и обычно указаны в технических условиях и рекомендациях к печати.

Планирование эксперимента и материалы. *Экспериментальный образец.* Для проверки возможности изготовления ПП до 5-го КТ была разработана топология (рис. 1), состоящая из наборов печатных проводников в виде каналов (канавок) квадратного сечения, которые могут быть заполнены проводящим материалом; расстояний между проводниками (зазоров) и сквозных отверстий. Ширины всех элементов проводящего рисунка (ЭПП) выбраны с учетом проверяемых КТ, диаметры отверстий – наиболее часто применяемые типовые значения.

Оборудование. Исследование проводилось на производственной базе Научно-образовательного центра "Центр аддитивных технологий" (НОЦ "ЦАТ") при МГТУ

им. Н. Э. Баумана, в состав которой входят два 3D-принтера отечественного производства: Picaso 3D Designer Classic 2016 (Picaso 3D) [9] и Hercules Strong 2017 (Imprinta) [10].

Экструзионное сопло. Исходя из предположения, что диаметр сопла должен быть меньше минимального размера ЭПП (т. е. 100 мкм) или равен ему, был проведен анализ доступности сопел подобного типоразмера и особенности их применения. В результате оказалось, что на отечественном рынке минимальный диаметр сопел составляет 0.2 мм, однако применяемые 3D-принтеры имеют нетиповые параметры резьбового соединения ЭС, в связи с чем выбор был ограничен следующими вариантами, поставляемыми официальным производителем: латунное сопло Ø0.2 мм и титановое сопло Ø0.5 мм. Несмотря на то, что последнее является более износостойким и, как следствие, позволяет применять материалы с температурой печати более 300 °С (например, полиэфирэфиркетон [PEEK]) и/или имеющие в своем составе угле-, стекловолокно или частицы металлов, оно имеет низкую теплопроводность и теоретически не позволяет проверить возможность изготовления ЭПП до 5-го КТ.

Особенностью применения ЭС с диаметрами отверстий менее 0.4 мм является возможность их засорения при печати.

Расходные материалы. В связи с тем, что полилактид (PLA) и акрилонитрил бутадиен стирол (ABS) являются основной составляющей большинства проводящих и стеклонаполненных филаментов (например, Conductive PLA (Protopasta), U3 ABS Conductive 2M (U3Print), TITAN GF-12 (Filamentarno!) и др.) и могут быть применены для печати латунными соплами диаметром до 0.4 мм, были выбраны отечественные материалы, представленные в табл. 1.

Табл. 1. Филаменты и некоторые параметры их печати

Tab. 1. Filaments and some parameters of their printing

Наименование	Производитель	Обозначение	Цвет	Температура разжижителя / РП, °С	
				Рекомендуемая	Заданная
PLA + Standart	Filamentarno!	PLA	Белый	220...240/40...60	205/60
ABS	FDPlast	ABS	Розовый	245...260/110...120	205/105
ABS GF-4	Filamentarno!	ABS +GF	Черный	230...250/100...105	235/105

Примечания:
 1. Для предотвращения отсоединения первых слоев образца использовался 100 %-й обдув, начиная с третьего слоя.
 2. Температура выбрана ниже рекомендуемой для уменьшения скорости растекания ЭМ. Минимально возможная температура, при которой происходило осаждение ЭМ, была определена опытным путем.
 3 ABS + GF представляет собой ABS, наполненный рубленым стекловолокном в объеме 4 % от всего филамента.

Очевидно, что наличие твердых частиц в филаменте значительно влияет на его свойства (например, усадку), и зависимости, полученные для PLA и ABS, в этом случае могут не подходить, однако могут быть полезны для дальнейших исследований в качестве начальной точки.

Несмотря на то, что стеклонаполненные филаменты могут повредить формовочное отверстие латунного ЭС, оценка возможности их применения является важным направлением развития 3D-печати ПП. В связи с этим для исследования данного типа материалов на ЭС Ø0.2 мм было гальванически нанесено покрытие химическим никелем толщиной до 5 мкм для повышения износостойкости.

Проводящие филаменты не были использованы ввиду их недоступности в Российской Федерации.

Программное обеспечение (ПО). Размер треугольной сетки STL-файла, созданного системой автоматизированного проектирования, будет влиять на точность воспроизведения формы элементов из твердотельной 3D-модели. Чем больше размер сетки, тем значительнее будет искажение. Для создания STL-файла экспериментального образца применялась программа SolidWorks Premium 2022 SP2.0, количество треугольников составило 1214 шт.

Данные, предоставленные исследовательскими группами Ф. Бауманна (F. Baumann) с соавторами [11] и Я. Брюа (J. Bryła) с соавто-

рами [12], свидетельствуют о влиянии слайсера на геометрическую точность напечатанного изделия, однако обоснование данного факта отсутствует. Возможно, это связано с алгоритмом выделения секущих плоскостей детали и/или расчетом траектории движения инструмента, которые пользователь не может контролировать.

Апостериори были выбраны слайсеры Ultimaker Cura (версия 5.2.1) и PrusaSlicer (версия 2.5.0). Тип прошивки обоих 3D-принтеров на базе Marlin. При этом первый слайсер удалось программно совместить с обоими 3D-принтерами, в отличие от второго, в связи с чем Prusa не применялся для печати образцов на 3D-принтере Picaso.

План эксперимента. Ввиду того, что часть влияющих факторов относится к свойствам филамента или скрытым от пользователя алгоритмам ПО, они были отнесены к входным неконтролируемым и неуправляемым факторам, а остальные представлены в табл. 2.

Таким образом, в работе исследовалось влияние диаметра ЭС и количества контуров на следующие выходные параметры:

- линейные размеры образца;
- ширину канала печатного проводника;
- расстояние между проводниками;
- диаметр сквозного отверстия.

Для проведения исследования был выбран полный факторный эксперимент типа 2². Полу-

Табл. 2. Входные контролируемые и управляемые факторы

Tab. 2. Controlled and managed input factors

Наименование	Значение	Ед. изм.
<i>Неварьируемые</i>		
Шаблон заполнения (в том числе для верхней и нижней поверхностей)	Прямолинейный	–
Плотность заполнения	100	%
Скорость перемещения при печати:		
– заполнение, периметры (в том числе внешние), мосты	30	мм/с
– маленькие периметры	15	мм/с
– заполнение пробелов	10	мм/с
Скорость печати первого слоя	20	мм/с
Радиус закрытия пробелов при нарезке	0.049	мм
Режим нарезки	Обычный	–
Разрешение нарезки	0	мм
Разрешение G-кода	0.0125	мм
Тип каймы	Кайма только снаружи	–
Ширина каймы	4	мм
<i>Варьируемые</i>		
Диаметр сопла (D)	0.2...0.4	мм
Высота слоя (в том числе первого)	$D/2$	мм
Количество контуров/периметров (P)	1...3	шт
Ширина экструзии (в том числе первый слой, периметры, заполнение)	D	мм

ченные математические модели имели вид полинома первого порядка:

$$Y(D, P) = b_0 + b_D D + b_P P + b_{DP} DP,$$

где Y – функция отклика; D – диаметр сопла, представленный в нормированных значениях ($\varnothing 0.2$ мм принят за "–1"; $\varnothing 0.4$ мм – "+1"); P – количество контуров, представленное в нормированных значениях (1 шт. принята за «–1»; 3 шт. – «+1»); b_0 – значение функции отклика в центре плана; b_D , b_P – коэффициенты, характеризующие степени влияния факторов D и P (соответственно) на функцию отклика; b_{DP} – коэффициент, характеризующий влияние взаимодействия факторов D и P .

Все математические модели были проверены на адекватность по критерию Фишера. Измерения линейных размеров образцов проводились с помощью штангенциркуля ШЦЦ-I-150-0,01 ГОСТ 166–89, а ЭПР – с помощью цифрового микроскопа Weller T0051383599N.

Ввиду отсутствия какой-либо нормативной документации, регламентирующей требования к ПП, изготовленным методами 3D-печати, оценка соответствия выходных факторов проводилась по ГОСТ Р 53429 [4] и ГОСТ 26246.5 [13].

Результаты. Полученные результаты разделены на несколько подразделов в соответствии с выбранными выходными параметрами.

Общий вид. Первые попытки изготовления образцов показали необходимость добавления фаски $0.1 \times 45^\circ$ для каждого сквозного отверстия со стороны слоя Bottom, так как на первых слоях печати происходило затекание материала и отверстия получались глухими.

При выполнении прямоугольных углов канавок на всех образцах наблюдаются скругления, равные диаметру ЭС.

Образцы, напечатанные с помощью ЭС $\varnothing 0.4$ мм, имеют шероховатую поверхность с "заусенцами" по краям, а также ярко выраженную текстуру шаблона заполнения (рис. 2).

На образцах, напечатанных с тремя контурами, в половине случаев наблюдаются зазоры между контурами и растрами (рис. 2), что может быть связано с недостаточным значением параметра слайсера "перекрытие линий заполнения с линиями периметра", которое было за-

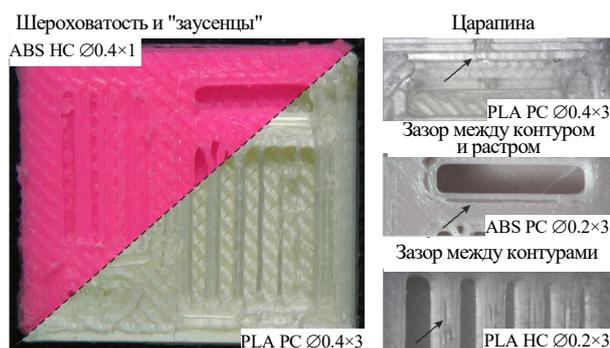


Рис. 2. Выявленные дефекты

Fig. 2. Identified defects

дано 5 %, и/или зазоры между контурами (рис. 2), что может являться причиной невозможности заполнения промежутка между контурами ЭПР, размер которого меньше диаметра ЭС [14]. Кроме того, так как большинство образцов были изготовлены на 3D-принтере Hercules с применением слайсера Cura, данный дефект, возможно, вызван несоответствием ожиданиям слайсера размера площади поперечного сечения ЭМ.

На некоторых образцах имеются царапины на верхней плоскости (рис. 2), что может являться следствием недостаточного поднятия ЭС над изделием при перемещении на новую позицию.

На образцах, изготовленных с помощью слайсера Prusa и ЭС $\varnothing 0.4$ мм, отсутствуют зазоры 5-го КТ, что, вероятно, обусловлено регулировкой потока материала и алгоритмами выделения секущих плоскостей детали, управляемыми слайсером.

Линейные размеры. Практически все полученные средние значения показывают отклонения линейных размеров в пределах установленного допуска (рис. 3):

- для ширины и длины ± 0.5 мм [13];
- для толщины ± 0.2 мм [4].

Исключения составляют лишь длина образца из ABS, напечатанного на 3D-принтере Picaso со слайсером Cura с ЭС $\varnothing 0.2$ мм и одним контуром ($L = 20.48$ мм), и толщина образца из PLA, напечатанного на 3D-принтере Hercules со слайсером Cura с ЭС $\varnothing 0.2$ мм и тремя контурами ($H = 2.77$).

Также было выявлено, что для ЭС $\varnothing 0.4$ мм преобладает отклонение значений линейных размеров в сторону увеличения, а для ЭС $\varnothing 0.2$ мм – в сторону уменьшения.

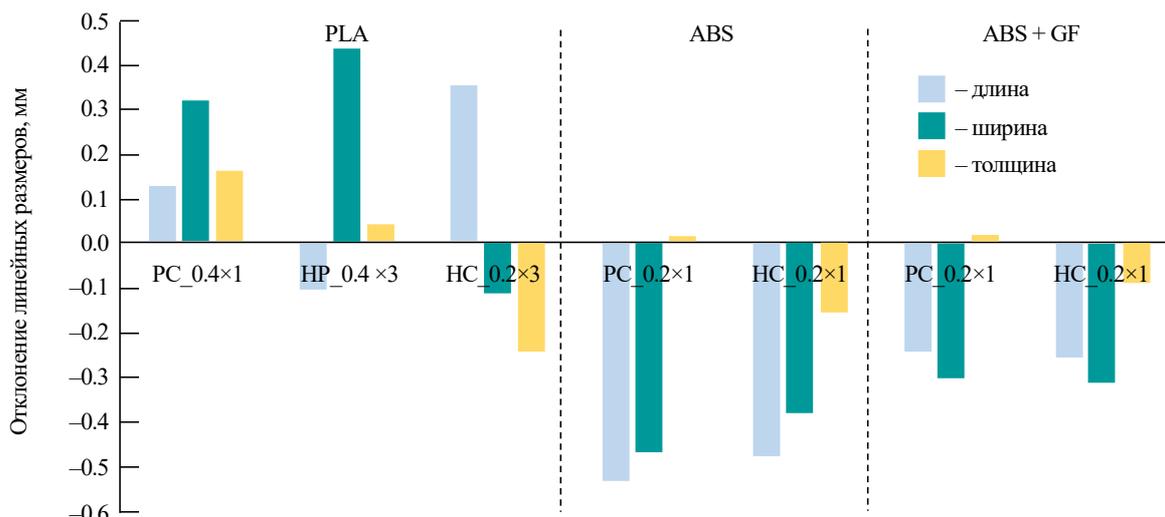


Рис. 3. Отклонения линейных размеров образцов, в наименьшей степени соответствующих требованиям

Fig. 3. Deviations of the linear dimensions of the samples that meet the requirements in the least degree

Сквозные отверстия. В большинстве случаев наблюдалось:

1. Для ЭС $\varnothing 0.4$ мм в сочетании:

а) с тремя контурами (за исключением образцов из PLA, изготовленных на 3D-принтере Hercules) – отсутствие отверстий;

б) с одним контуром и с учетом исключенных выше образцов – наличие только отверстия с заданным диаметром 1 мм со значительным отклонением формы.

2. Для слайсера Prusa – наличие только отверстия с заданным диаметром 1 мм со значительным отклонением формы.

3. Для ЭС $\varnothing 0.2$ мм – значительное отклонение диаметра сквозного отверстия от номинального значения (более 0.12 мм), превышающее допуск ± 0.1 мм, выбранный для отверстий без металлизации для 3–5-го КТ [4, п. 5.3.4] (рис. 4).

4. Чем больше количество контуров, тем

больше искажение формы и/или отклонение от заданного размера (рис. 4).

Несмотря на то, что показанные на рис. 4 для PLA отверстия имеют самое низкое отклонение размеров диаметров в отличие от других образцов PLA, они являются глухими, а не сквозными ввиду затекания материала в отверстия, вызванного меньшей скоростью печати первого слоя. В пределах допуска были получены сквозные отверстия только на образце ABS + GF (рис. 4).

Отклонение значений от номинального диаметра, вероятнее всего, является следствием усадки материала при отверждении.

Каналы печатных проводников и расстояние между ними. Для 1-го и 2-го КТ полученные средние значения в большинстве случаев находятся в пределах допуска (табл. 3 и 4). При этом для значений расстояния между проводниками характерно достижение более высокого

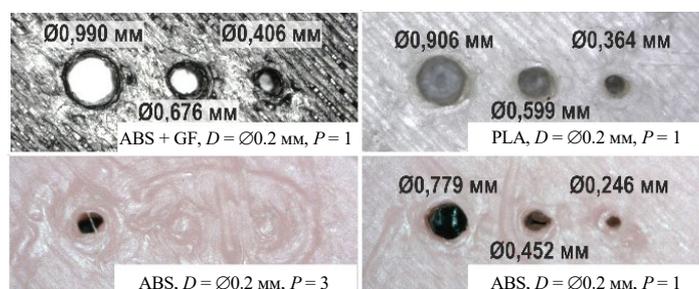


Рис. 4. Вид отверстий, полученных на образцах, изготовленных на 3D-принтере Hercules с помощью слайсера Cura (указаны средние значения)

Fig. 4. Sample vias (average values are indicated). 3D-printer – Hercules, slicer – Cura

Табл. 3. Соответствие размеров ширины канала проводника требованиям

Tab. 3. Compliance of the trace channel width with the requirements

Обозначение образца	D, мм	P, мм	Класс точности (норма по [4, п. 5.3.14], мм)				
			1 (0.75 ± 0.15)	2 (0.45 ± 0.10)	3 (0.25 ± 0.05)	4 (0.15 ± 0.03)	5 (0.10 _{-0.03})
PLA PC	0.2	1	0.788	0.523	0.332	0.218	0.180
PLA HC	0.4	3	0.727	0.451	–	–	–
	0.2	3	0.780	0.497	0.319	0.256	0.207
PLA HP	0.2	1	0.756	0.442	0.268	0.189	0.163
ABS PC	0.2	3	0.683	0.491	0.277	0.335	0.232
ABS HC	0.4	1	0.666	0.506	0.308	–	–
	0.2	3	0.795	0.540	0.326	0.223	0.174
Количество образцов с размерами ЭПР в пределах допуска, % от общего числа			70	65	20 (40 – для ЭС Ø0.2 мм)	5 (10 – для ЭС Ø0.2 мм)	0
<p><i>Примечания:</i></p> <p>1. Обозначение образца имеет структуру "MMM ПС", где MMM – материал, П – 3D-принтер (H – Hercules, P – Picaso), C – слайсер (C – Cura, P – Prusa).</p> <p>2. Красным выделены значения размеров, выходящие за пределы допуска.</p>							

Табл. 4. Соответствие расстояния между проводниками требованиям

Tab. 4. Compliance of the space with the requirements

Обозначение образца	D, мм	P, мм	Класс точности (норма по [4, п. 5.3.14], мм)				
			1 (0.75 ± 0.15)	2 (0.45 ± 0.10)	3 (0.25 ± 0.05)	4 (0.15 ± 0.03)	5 (0.10 _{-0.03})
PLA PC	0.2	1	0.680	0.410	0.282	0.204	0.157
PLA HC	0.4	3	0.861	0.614	0.288	–	–
	0.2	3	0.637	0.335	0.294	0.166	0.114
PLA HP	0.2	1	0.759	0.462	0.183	0.210	0.198
ABS PC	0.2	3	0.674	0.451	0.273	0.259	0.246
ABS HC	0.4	1	0.768	0.611	0.291	–	–
	0.2	3	0.550	0.480	0.323	0.157	0.149
Количество образцов с размерами расстояний между проводниками в пределах допуска, % от общего числа			75	60	40 (50 – для ЭС Ø0.2 мм)	15 (30 – для ЭС Ø0.2 мм)	0
<p><i>Примечания:</i></p> <p>1. Обозначение образца имеет структуру "MMM ПС", где MMM – материал, П – 3D-принтер (H – Hercules, P – Picaso), C – слайсер (C – Cura, P – Prusa).</p> <p>2. Красным выделены значения размеров, выходящие за пределы допуска.</p>							

КТ, чем для каналов проводников. Анализ результатов измерений в отношении обеспечения 3-го КТ показал следующее:

– 20 % изготовленных образцов соответствует КТ по ширине канала проводника, причем все эти образцы были изготовлены с применением ЭС Ø0.2 мм (т. е. в пределах допуска получены значения на 40 % образцах, изготовленных с применением ЭС Ø0.2 мм);

– 40 % изготовленных образцов соответствует КТ по расстоянию между проводниками, причем 60 % из них были изготовлены с применением ЭС Ø0.2 мм, т. е. среди всех образцов, изготовленных с использованием ЭС Ø0.2 мм, соответствовала КТ половина, а среди образцов, изготовленных с использованием ЭС Ø0.4 мм, – 30 %.

В связи с тем, что процент образцов, изготовленных с применением ЭС Ø0.4 мм и соответствующих 3-му КТ, мал (а именно 0 % для ширины каналов проводников и 30 % для расстояния между проводниками) и в соответствии с [4] КТ определяется наличием хотя бы одного элемента конструкции, соответствующего значениям класса, ЭС Ø0.4 мм позволяет изготовить ЭПР до 2-го КТ, а Ø0.2 мм – до 3 КТ, что согласуется с предположением о том, что диаметр отверстия определяет минимальный размер элемента.

При изготовлении ЭПР 4-го КТ в допуске были лишь ЭПР на четырех образцах, что, вероятно, является случайностью, тем не менее это показывает, что при верном управляющем решении (например, создании компенсацион-

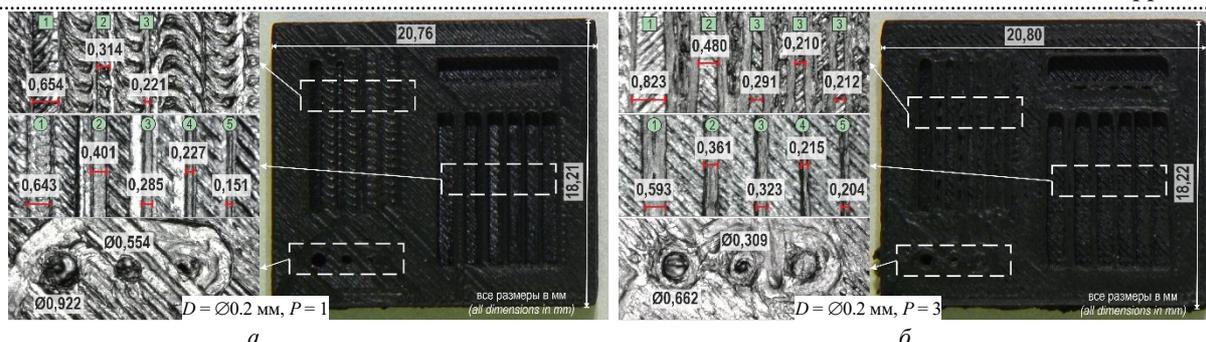


Рис. 5. Вид напечатанных образцов, в наибольшей степени соответствующих требованиям. Материал – ABS + GF, слайсер – Cura, ЭС – диаметром $\varnothing 0.2$ мм и покрытое химическим никелем, 3D-принтер: а – Picaso; б – Hercules

Fig. 5. Samples most corresponding to the requirements (average values are indicated).

Material – ABS + GF, slicer – Cura, nozzle – $\varnothing 0.2$ mm coated with chemical nickel, 3D-printer: а – Picaso; б – Hercules

ной модели) возможно увеличение процента ПП 3-го КТ, соответствующих требованиям.

При изготовлении ЭПР 5-го КТ все значения существенно отклонялись от номинального, что является неприемлемым.

Печать стеклонаполненным филаментом. Торцы образцов ABS + GF, напечатанные на 3D-принтере Hercules, имеют большую шероховатость, чем у напечатанных на 3D-принтере Picaso, что, скорее всего, связано с прочисткой ЭС после засорения перед их печатью.

Все полученные линейные размеры соответствовали требованиям.

За исключением образца, представленного на рис. 4, на всех остальных образцах произошло частичное зарастание отверстий на промежуточных слоях печати.

Наилучшее соответствие требованиям в отношении ЭПР имеют образцы, представленные на рис. 5. Полученные размеры ЭПР имеют меньшее

отклонение от номинальных значений по сравнению с ABS без рубленого стекловолокна.

Обсуждение. Для образцов, изготовленных из ABS на 3D-принтере Picaso с помощью слайсера Cura, построены графики зависимости отклонений размеров от диаметра ЭС (рис. 6). В связи с тем, что на данных образцах с ЭС $\varnothing 0.4$ мм удалось получить лишь ширину канала 1-го КТ, а для ЭС $\varnothing 0.2$ мм, как показано ранее, в пределах допуска возможно получить расстояние между проводниками до 3-го КТ, графики ограничены этими КТ. Из рисунка видно, что независимо от количества контуров с увеличением диаметра ЭС отклонение от номинальных значений линейных размеров уменьшается, а для размеров ЭПР и толщины – возрастает.

На основании измеренных значений выходных параметров были определены коэффициенты математических моделей (ММ) и предло-

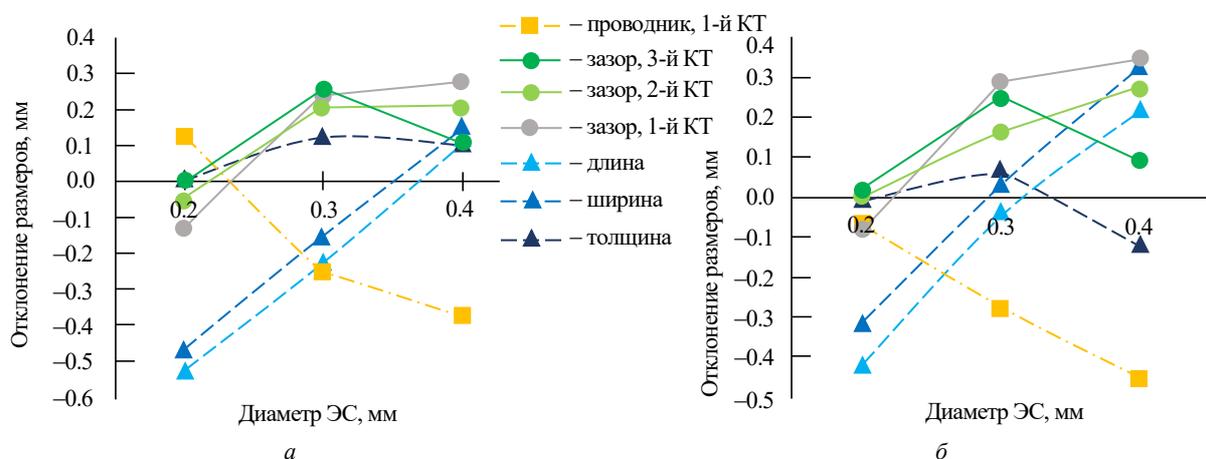


Рис. 6. Зависимость отклонения полученных размеров от диаметра ЭС для образцов, изготовленных из ABS на 3D-принтере Picaso с помощью слайсера Cura: а – 1 контур; б – 3 контура

Fig. 6. Influence of the nozzle diameter on deviations in the dimensions of the conductive pattern elements for the experimental samples made of ABS on a 3D printer Picaso using a slicer Cura: а – 1 contour; б – 3 contours

Табл. 5. Рекомендуемые управляющие действия

Tab. 5. Recommended management actions

Тип	Параметр	PLA			ABS	
		Cura		Prusa	Cura	
		Picaso	Hercules		Picaso	Hercules
Линейные размеры	Ширина (W)	$\downarrow D$; $\uparrow P$	$\uparrow D$; $\uparrow P$	$\downarrow D$	$\uparrow D$; $\downarrow P$	$\uparrow D$; $\uparrow P$
	Длина (L)	$\uparrow D$; $\uparrow P$	$\downarrow D$; $\downarrow P$	$\uparrow \downarrow D$; $\downarrow \uparrow P$	$\uparrow D$; $\downarrow P$	$\uparrow D$
	Толщина (H)	$\downarrow D$; $\uparrow P$	$\uparrow D$	$\uparrow D$	$\uparrow P$; $\downarrow D$	$\uparrow D$
	Рекомендация	$\downarrow D$; $\uparrow P$	$\uparrow D$; $\downarrow P$	$\downarrow D$; $\uparrow P$	$\uparrow D$; $\downarrow P$	$\uparrow D$
Размеры ЭПР	Ширина канала печатного проводника	1-й КТ: $\downarrow D$; $\downarrow P$ 2-й КТ: $\uparrow D$; $\downarrow P$	1-й КТ: $\uparrow D$; $\uparrow P$ 2-й КТ: $\uparrow D$; $\uparrow P$	1-й КТ: $\downarrow D$; $\downarrow P$ 2-й КТ: $\downarrow D$	1-й КТ: $\downarrow D$; $\uparrow P$ 2-й КТ: $\downarrow D$; $\uparrow P$	1-й КТ: $\downarrow D$; $\uparrow P$ 2-й КТ: $\uparrow D$; $\uparrow P$
	Расстояние между проводниками	1, 2-й КТ: $\downarrow D$; $\uparrow P$ 3-й КТ: $\downarrow D$; $\downarrow P$	1-й КТ: $\uparrow D$; $\downarrow P$ 2-й КТ: $\downarrow D$ 3-й КТ: –	1-й КТ: $\downarrow D$; $\uparrow P$ 2-й КТ: $\downarrow D$ 3-й КТ: $\downarrow D$; $\downarrow P$	1, 2-й КТ: $\downarrow D$; $\uparrow P$ 3-й КТ: $\downarrow D$	1-й КТ: $\uparrow D$ 2-й КТ: $\downarrow D$ 3-й КТ: –
	Рекомендация	$\downarrow D$; $\downarrow P$	$\downarrow D$; $\uparrow P$	$\downarrow D$; $\downarrow P$	$\downarrow D$; $\uparrow P$	$\downarrow D$; $\uparrow P$
	Диаметр сквозного отверстия	Построение ММ невозможно. Тем не менее рекомендуется $\downarrow D$; $\downarrow P$				

Примечание. Применены следующие графические обозначения: полужирное начертание – фактор или взаимодействие факторов, оказывающий(ее) наибольшее влияние; зачеркивание – влияние оказывает лишь взаимодействие данного фактора; отсутствие – влияние фактора и его взаимодействия незначительно; "↑", "↓" – рекомендуется увеличить или уменьшить значение параметра соответственно. Значимость коэффициентов определялась по критерию Стьюдента ($t_{кр}(0.05; 12) = 2.18$)

жены рекомендации по выбору оптимальных параметров (табл. 5).

Анализ данной таблицы показывает, что в 74 % случаев выбор диаметра ЭС оказывает наибольшее влияние, однако количество контуров является не менее важным фактором, что согласуется с зависимостями, показанными на графиках ранее.

Отсутствие влияния количества контуров на толщину изделия, вероятно, обусловлено задаваемым в слайсере параметром "высота слоя", который был выражен через зависимость от диаметра ЭС.

Согласно ММ для 3D-принтера Hercules и слайсера Cura оптимальным сочетанием факторов является ЭС $\varnothing 0.4$ мм с тремя контурами для PLA и с одним – для ABS, что противоречит рекомендациям (табл. 5). Данное изменение обусловлено значительной шероховатостью и наличием заусенцев на торцах данных образцов, что является неприемлемым. Таким образом, было подобрано другое сочетание факторов, удовлетворяющее не только наименьшему отклонению размеров от номинальных значений, но и качеству поверхности.

Относительно линейных размеров предполагается, что комбинация уменьшения диаметра ЭС и увеличения количества контуров (в том числе и наоборот) связана с перепадом давления на входе и на выходе из ЭС. Н. А. Сикинदारом (N. A. Sukindar) с соавторами [15] при проведе-

нии исследований было установлено, что перепад давления при использовании ЭС $\varnothing 0.2$ мм возрастает в 3 раза по сравнению с ЭС $\varnothing 0.4$ мм. В свою очередь, это может привести к непостоянству потока материала, т. е. изменению площади поперечного сечения ЭМ, и, как следствие, к неравномерной ширине раstra. Таким образом, ввиду большей равномерности ширины раstra для ЭС $\varnothing 0.4$ мм не требуется большого количества контуров для компенсации отклонений от номинальных значений линейных размеров в отличие от ЭС $\varnothing 0.2$ мм.

Что касается размеров ЭПР, уменьшение диаметра ЭС обусловлено стремлением получить минимальный размер канала проводника.

Применение большого количества контуров или диаметра ЭС для 3D-принтера Hercules в сочетании со слайсером Cura, вероятно, является следствием недостаточной совместимости ПО с оборудованием, из-за которой слайсер некорректно рассчитывает скорость потока материала, т. е. его ожидания о ширине раstra не совпадают с реальным значением.

Подобное изменение в рекомендациях при переходе от PLA к ABS может быть связано с реологическими свойствами материалов, усадкой при отверждении или наличием разбухания ЭМ. Полученные зависимости для ABS + GF совпадают с рекомендациями для PLA, что может свидетельствовать о схожести некоторых свойств материалов. Однако проверить данные умозаключения пока невозможно ввиду отсутствия

Табл. 6. Значимость факторов для математических моделей, построенных для полных факторных экспериментов типа 2^3 и 2^4

Tab. 6. Significance of factors for mathematical models constructed for full factorial experiments 2^3 and 2^4

Параметр	КТ	Степень значимости факторов (наиболее → наименее)	
		ПФЭ типа 2^3 : D, P, S	ПФЭ типа 2^4 : D, P, E, M
Ширина (W)	–	S→D→P	D→E→M→P
Длина (L)	–	S→P, D	D→M→P→E
Толщина (H)	–	D→S	D→P, E, M
Ширина канала печатного проводника	1	P→S, D	D→E→P→M
	2	P→D, S	Недостаток данных
Расстояние между проводниками	1	D→S, P	D→E→P, M
	2	D→S	D→M→P, E
	3	D→P, S	D→P, E, M

Примечания:
1. Применены следующие обозначения и сокращения: ПФЭ – полный факторный эксперимент; D – диаметр; P – количество периметров; S – слайсер; E – 3D-принтер; M – материал.
2. Применены следующие графические обозначения: зачеркивание – влияние оказывает лишь взаимодействие данного фактора; отсутствие – влияние фактора и его взаимодействия незначительно; "→" – уменьшение степени влияния фактора в сторону, в которую указывает стрелка; если факторы перечислены через запятую, то разница в степенях их влияния незначительна.

справочных данных и/или результатов исследований на подобную тематику.

На основе полученных экспериментальных данных также построены ММ для полных факторных экспериментов (ПФЭ) типа 2^3 и 2^4 . В связи с тем, что такие факторы, как слайсер, материал и 3D-принтер, были представлены как совокупность характеризующих их свойств, а не в виде количественных значений определенных параметров, по полученным коэффициентам моделей оценена лишь степень влияния факторов на каждый из рассматриваемых выходных параметров (табл. 6). Анализ данной таблицы показывает значимость каждого рассмотренного фактора, причем доминирующее влияние в большинстве случаев оказывает диаметр ЭС. Предполагается, что в общем случае степень влияния возрастает следующим образом: диаметр ЭС → слайсер → 3D-принтер → количество контуров → материал.

Заключение и выводы. Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

– возможно изготовление ПП до 2-го КТ при использовании ЭС $\varnothing 0.4$ мм и до 3-го КТ для ЭС $\varnothing 0.2$ мм, что согласуется с предположением о том, что диаметр отверстия определяет минимальный размер элемента. Таким образом, для изготовления ПП 5-го КТ необходима разработка ЭС $\varnothing 0.1$ мм и менее. В таком случае для сопел подобного размера большую актуальность приобретут вопросы, связанные с их засорением при печати стеклонаполненными филаментами и с

изменением ширины растра, вызванным перепадом давлений на входе и на выходе из ЭС;

– гальваническое нанесение химического никеля на латунное ЭС $\varnothing 0.2$ мм позволяет повысить его износостойкость для печати стеклонаполненными филаментами, однако проблема засорения ЭС остается актуальной. Тем не менее, вероятно, сокращению случаев засорения ЭС будет способствовать уменьшение размера рубленого стекловолокна в филаменте до тех пор, пока не будет достигнут предельный минимально возможный размер, предположительно равный половине диаметра сопла;

– перед изготовлением ПП рекомендуется проводить тестовую печать с последующим измерением интересующих параметров напечатанных образцов для возможного внесения корректирующего действия в процесс или создания компенсационной модели на основе полученных результатов;

– в связи с тем, что диаметр ЭС определяет минимальный размер печатаемого элемента, для более точного воспроизведения ЭПР рекомендуется отдавать предпочтения ЭС, диаметр которого меньше требуемого КТ или равен ему, и в случае неудовлетворительных отклонений размеров от номинальных значений корректировать полученные размеры увеличивая количество контуров, так как предполагается, что большее количество контуров компенсирует неравномерность ширины растра, вызванную перепадом давления на входе и на выходе из ЭС (наиболее актуально для ЭС $\varnothing 0.3$ мм и менее).

Кроме того, экспериментально подтверждена значимость влияния диаметра ЭС, количества контуров, слайсера, материала и 3D-принтера на размерные показатели ПП (ли-

нейные размеры; ширина канала печатного проводника; расстояние между проводниками; диаметр сквозного отверстия).

Авторский вклад

Смирнова Ольга Николаевна – анализ литературы по теме исследования; разработка методик проведения экспериментов; обработка полученных результатов; обсуждение результатов; подготовка статьи.

Александров Александр Александрович – изготовление экспериментальных образцов; обсуждение результатов; подготовка статьи.

Боброва Юлия Сергеевна – обсуждение результатов; подготовка статьи.

Моисеев Константин Михайлович – постановка задачи; обсуждение результатов; руководство научными исследованиями; подготовка статьи.

Author's contribution

Olga N. Smirnova, literature review; development of research methods; analysis of the experimental results; discussion of the results; preparation of the paper text.

Alexander A. Aleksandrov, manufacturing of experimental samples; discussion of the results; preparation of the paper text.

Yulia S. Bobrova, discussion of the results; preparation of the paper text.

Konstantin M. Moiseev, definition of research scopes; discussion of the results; management of the work; preparation of the paper text.

Список литературы

1. Смирнова О. Н., Боброва Ю. С., Моисеев К. М. Методы 3D-печати для изготовления печатных плат // Электроника: наука, технология, бизнес. 2022. № 8. С. 128–134. doi: 10.22184/1992-4178.2022.219.8.128.136

2. Nelson M. D., Ramkumar N., Gale B. K. Flexible, transparent, sub-100 µm microfluidic channels with fused deposition modeling 3D-printed thermoplastic polyurethane // J. of Micromechanics and Microengineering. 2019. Vol. 29, № 9. P. 1–8. doi: 10.1088/1361-6439/ab2f26

3. Fabrication of conductive paths on a fused deposition modeling substrate using inkjet deposition / W. Zhou, F. A. List, C. E. Duty, S. S. Babu // Rapid Prototyping J. 2016. Vol. 22, № 1. P. 77–86. doi: 10.1108/RPJ-05-2014-0070

4. ГОСТ Р 53429–2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. М.: Стандартинформ, 2018. 11 с.

5. Смирнова О. Н., Боброва Ю. С., Моисеев К. М. Анализ методов 3D-печати для изготовления ПП: метод послойного наложения филамента. Ч. 5 // Технологии в электронной промышленности. 2021. № 6. С. 48–55.

6. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / пер. с англ.; под ред. И. В. Шишковского. М.: Техносфера, 2020. 648 с.

7. Turner B. N., Strong R., Gold S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling // Rapid Prototyping J. 2014. Vol. 20. P.192–204. doi: 10.1108/RPJ-01-2013-0012

8. Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling / M. L. Shofner, K. Lozano, F. J. Rodriguez-Macias, E. V. Barrera // J. of Applied Polymer Science. 2003. Vol. 89, № 11. P. 3081–3090. doi: 10.1002/app.12496

9. Picaso 3D Designer Classic. URL: <https://picaso-3d.ru/ru/products/printers/classic/> (дата обращения 14.09.2023)

10. 3D принтер. Hercules Strong. 2017. URL: <https://drive.google.com/file/d/1k0Nj2tBegzr6Bj4vqHCTMxF8wr1mCenj/view?usp=sharing> (дата обращения 28.12.2022)

11. Influence of slicing tools on quality of 3D printed parts / F. Baumann, H. Bugdayci, J. Grunert, F. Keller, D. Roller // Computer-Aided Design & Applications. 2015. Vol. 13, № 1. P. 14–31. doi: 10.1080/16864360.2015.1059184

12. Bryła J., Martowicz A. Study on the Importance of a Slicer Selection for the 3D Printing Process Parameters via the Investigation of G-Code Readings // Machines. 2021. Vol. 9. P. 163. doi: 10.3390/machines9080163

13. ГОСТ 26246.5–89 (МЭК 249-2-5-87). Материал электроизоляционный фольгированный нормированной горючести для печатных плат на основе стеклоткани, пропитанной эпоксидным связующим. Технические условия. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. 7 с.

14. Проблемы качества 3D-печати. URL: <https://3dpt.ru/page/faq> (дата обращения 21.03.2023)

15. Analyzing the effect of nozzle diameter in fused deposition modeling for extruding polylactic acid

using open-source 3D printing / N. A. Sukindara, M. Ariffin, B. Baharudin, C. Jaafar, M. Ismail // J. Teknologi. 2016. Vol. 78, № 10. P. 7–15. doi: 10.11113/jt.v78.6265

Информация об авторах

Смирнова Ольга Николаевна – аспирантка кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор 17 научных публикаций. Сфера научных интересов – печатные платы и печатные узлы в части технологий их изготовления; методы испытаний и контроля.

Адрес: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: olga.smirnova.nik@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-3625-3250>

Александров Александр Александрович – аспирант кафедры технологий обработки материалов Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор 5 научных публикаций. Сфера научных интересов – аддитивные технологии; лазерные аддитивные технологии; коаксиальное лазерное плавление; исследование технологической прочности жаропрочных сплавов.

Адрес: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: alexandrov@bmsu.ru

<https://orcid.org/0009-0009-8980-7866>

Боброва Юлия Сергеевна – инженер (2006), инженер-технолог кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор более 40 научных публикаций. Сфера научных интересов – технологии изготовления и контроля печатных плат.

Адрес: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: ju.s.bobrova@gmail.com

<http://orcid.org/0009-0009-7231-7422>

Моисеев Константин Михайлович – кандидат технических наук (2012), доцент кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (2006). Автор более 50 научных публикаций. Сфера научных интересов – микро- и наноэлектроника; вакуумная и плазменная электроника; вакуумные технологические процессы и оборудование.

Адрес: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: k.moiseev@bmsu.ru

<http://orcid.org/0000-0002-8753-7737>

References

1. Smirnova O. N., Bobrova Yu. S., Moiseev K. M. 3D Printing Methods for PCB Manufacture. Electronics: Science, Technology, Business. 2022, no. 8, pp. 128–134. doi: 10.22184/1992-4178.2022.219.8.128.136 (In Russ.)

2. Nelson M. D., Ramkumar N., Gale B. K. Flexible, Transparent, Sub-100 μm Microfluidic Channels with Fused Deposition Modeling 3D-Printed Thermoplastic Polyurethane. J. of Micromechanics and Microengineering. 2019, vol. 29, no. 9, pp. 1–8. doi: 10.1088/1361-6439/ab2f26

3. Zhou W., List F. A., Duty C. E., Babu S. S. Fabrication of Conductive Paths on a Fused Deposition Modeling Substrate Using Inkjet Deposition. Rapid Prototyping J. 2016, vol. 22, no. 1, pp. 77–86. doi: 10.1108/RPJ-05-2014-0070

4. GOST R 53429–2009. Printed Circuit Boards. Basic Parameters of Structure. Moscow, *Standartin-form*, 2018, 11 p. (In Russ.)

5. Smirnova O. N., Bobrova Yu. S., Moiseev K. M. Analysis of 3D Printing Methods for the Manufacture

of PCD: Fused Deposition Modeling. Part 5. Technologies in the Electronic Industry. 2021, no. 6, pp. 48–55. (In Russ.)

6. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Tekhnologii aditivnogo proizvodstva. Trekhmernaya pechat', bystro prototipirovanie i pryamoe tsifrovoye proizvodstvo* [Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing]. Transl., ed. by I. V. Shishkovskii. Moscow, *Tekhnosfera*, 2020, 648 p. (In Russ.)

7. Turner B. N., Strong R., Gold S. A. A Review of Melt Extrusion Additive Manufacturing Processes: I. Process Design and Modeling // Rapid Prototyping J. 2014, vol. 20, pp. 192–204. doi: 10.1108/RPJ-01-2013-0012

8. Shofner M. L., Lozano K., Rodríguez-Macías F. J., Barrera E. V. Nanofiber-Reinforced Polymers Prepared by Fused Deposition Modeling. J. of Applied Polymer Science. 2003, vol. 89, no. 11, pp. 3081–3090. doi: 10.1002/app.12496

9. Picaso 3D Designer Classic. Available at:

<https://picaso-3d.ru/ru/products/printers/classic/> (accessed 14.09.2023)

10. 3D Printer. Hercules Strong. 2017. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1k0Nj2tBegzr6Bj4vqHCTMxF8wr1mCenj/view?usp=sharing> (accessed 28.12.2022) (In Russ.)

11. Baumann F., Bugdayci H., Grunert J., Keller F., Roller D. Influence of Slicing Tools on Quality of 3D Printed Parts. *Computer-Aided Design & Applications*. 2015, vol. 13, no. 1. pp. 14–31. doi: 10.1080/16864360.2015.1059183

12. Bryła J., Martowicz A. Study on the Importance of a Slicer Selection for the 3D Printing Process Parameters via the Investigation of G-Code Readings. *Machines*. 2021, vol. 9, p. 163. doi: 10.3390/machines9080163

13. GOST 26246.5–89 (МЭК 249-2-5-87). Epoxide-impregnated glass fabric foil-clad electrical insulating material of rated combustibility for printed plates. Specifications. Moscow, *IPK Izdatelstvo Standartov*, 2002, 7 p. (In Russ.)

14. 3D Printing Quality Problems. Available at: <https://3dpt.ru/page/faq> (accessed 21.03.2023) (In Russ.)

15. Sukindara N. A., Ariffin M., Baharudin B., Jaafar C., Ismail M. Analyzing the Effect of Nozzle Diameter in Fused Deposition Modeling for Extruding Poly(lactic Acid) Using Open-Source 3D Printing. *J. Teknologi*. 2016, vol. 78, no. 10, pp. 7–15. doi: 10.11113/jt.v78.6265

Information about the authors

Olga N. Smirnova, postgraduate student of the Department of Electronic Engineering Technologies of the Bauman Moscow State Technical University. The author of 17 scientific publications. Area of expertise: printed circuit boards and their assembly; manufacturing technologies; test and control methods.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 5/1, 2-ya Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia

E-mail: olga.smirnova.nik@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-3625-3250>

Alexander A. Aleksandrov, postgraduate student of the Department of Materials processing technologies of the Bauman Moscow State Technical University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: additive technologies; laser additive technologies; coaxial laser melting; study of technological strength of heat-resistant alloys.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 5/1, 2-ya Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia

E-mail: alexandrov@bmstu.ru

<https://orcid.org/0009-0009-8980-7866>

Yulia S. Bobrova, Engineer (2006), Process Engineer, of the Department of Electronic Engineering Technologies of the Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: technologies of manufacturing and control of printed circuit boards.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 5/1, 2-ya Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia

E-mail: ju.s.bobrova@gmail.com

<http://orcid.org/0009-0009-7231-7422>

Konstantin M. Moiseev, Cand. Sci. (Eng.) (2012), Senior Lecturer of Department of Electronic Engineering Technologies of the Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: micro- and nanoelectronics; vacuum and plasma electronics; vacuum technological processes and equipment.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 5/1, 2-ya Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia

E-mail: k.moiseev@bmstu.ru

<http://orcid.org/0000-0002-8753-7737>

Математическое моделирование пространственно-поляризационных характеристик триортогонального антенного элемента для задач пеленгования КВ-диапазона

Г. С. Грибов✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

АО «НИИ "Вектор"», Санкт-Петербург, Россия

✉ggribov@yandex.ru

Аннотация

Введение. Одной из наиболее важных и актуальных задач современного радиомониторинга КВ-диапазона является повышение точности и чувствительности пеленгования радиосигналов. С учетом распространения радиоволн КВ-диапазона через слои ионосферы, в которой происходит изменение поляризационных параметров проходящей электромагнитной волны (ЭМВ), в качестве одного из вариантов повышения точности и чувствительности пеленгования КВ-радиосигналов рассматривается использование в составе антенной решетки антенного элемента, который принимает обе составляющие электромагнитного поля.

Цель работы. Сравнительный анализ предложенного триортогонального антенного элемента с существующими решениями для задач пеленгования КВ-диапазона.

Материалы и методы. Математическое моделирование антенных элементов и построение пространственно-поляризационных характеристик в среде программирования MATLAB с помощью дополнения Phased array toolbox.

Результаты. Построены пространственно-поляризационные характеристики исследуемой триортогональной антенны и произведено сравнение с несимметричным вертикальным вибратором и биортогональной антенной. В ходе сравнения установлено, что триортогональная антенна на малых углах места обеспечивает энергетический выигрыш по сравнению с биортогональной антенной и несимметричным вертикальным вибратором до 4.5 дБ. На углах места от 30 до 60° повышение качества сигнала, принятого триортогональным антенным элементом, достигает 3 дБ, а на углах места больше 60° – 2 дБ.

Заключение. По полученным пространственно-поляризационным характеристикам рассматриваемая триортогональная антенна может входить в состав базисной антенной решетки КВ-диапазона. Использование данной антенны позволит повысить точность и чувствительность пеленгования за счет согласования антенного элемента с поляризацией ЭМВ.

Ключевые слова: триортогональная антенна, биортогональная антенна, несимметричный вертикальный вибратор, пеленгование, КВ-диапазон, поляризация, пространственно-поляризационная характеристика, диаграмма направленности, MATLAB

Для цитирования: Грибов Г. С. Математическое моделирование пространственно-поляризационных характеристик триортогонального антенного элемента для задач пеленгования КВ-диапазона // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 95–105. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-95-105

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 14.04.2023; принята к публикации после рецензирования 08.06.2023; опубликована онлайн 28.09.2023



Simulation of Spatial Polarization Characteristics of a Triorthogonal Antenna Element for the Tasks of HF Band Bearing

Grigory S. Gribov✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

JSC "Research Institute "Vector", St Petersburg, Russia

✉ggribov@yandex.ru

Abstract

Introduction. Achieving improved accuracy and sensitivity of the direction finding of radio signals represents a relevant research direction in the field of modern HF radio monitoring. HF radio waves propagate through ionospheric layers, which distorts the polarization parameters of the passing electromagnetic wave (EMW). One possible approach to improve the accuracy and sensitivity of the direction finding of HF radio signals consists in the use of an antenna element capable of accepting both components of the electromagnetic field in the antenna array.

Aim. A comparative analysis of the proposed triorthogonal antenna element with existing solutions for the tasks of HF band bearing.

Materials and methods. Antenna elements and their spatial polarization characteristics were simulated in the MATLAB environment using the Phased Array toolbox.

Results. The spatial polarization characteristics of the triorthogonal antenna under study were constructed and compared with an asymmetric vertical vibrator and a biorthogonal antenna. The comparison showed that at small elevation angles, the triorthogonal antenna ensures an energy gain of up to 4.5 dB compared to a biorthogonal antenna and an asymmetric vertical vibrator. At elevation angles of 30...60° and over 60°, the increase in the quality of a signal received by the triorthogonal antenna element reaches 3 dB and 2 dB, respectively.

Conclusion. According to the obtained spatial polarization characteristics, the triorthogonal antenna under study can be part of a large-base antenna array of the HF band. The use of this antenna will increase the accuracy and sensitivity of direction finding by means of matching the antenna element with the EMW polarization.

Keywords: triorthogonal antenna, biorthogonal antenna, asymmetric vertical vibrator, direction finding, HF band, polarization, spatial polarization characteristics, radiation pattern, MATLAB

For citation: Gribov G. S. Simulation of Spatial Polarization Characteristics of a Triorthogonal Antenna Element for the Tasks of HF Band Bearing. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 95–105. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-95-105

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 14.04.2023; accepted 08.06.2023; published online 28.09.2023

Введение. Распространение радиоволн КВ-диапазона зависит от состояния ионосферы. Под воздействием магнитного поля в ионосфере возникают эффекты Фарадея и Коттона–Мутона, которые приводят к изменению начальной поляризации и параметров поляризации передающей электромагнитной волны (ЭМВ), а также расщеплению волны на обыкновенную и необыкновенную составляющие [1–5]. В итоге в точке приема формируется волна, которая представляет собой суперпозицию обыкновенной и необыкновенной волн. Данный фактор влияет на качество приема сигнала.

Как известно, большинство антенных решеток для задач пеленгования КВ-диапазона построено на базе антенных элементов, принимающих лишь одну из компонент электромагнитного поля [6]. Такие антенные элементы не могут решить в полной мере вопрос снижения влияния интерференционных и поляризационных замираний на качество принимаемого сигнала.

Для повышения качества принимаемого сигнала проведено большое количество исследований по использованию биортогональных и триортогональных антенн в составе антенных решеток [7–9].



Рис. 1. Примеры триортогональных антенных элементов

Fig. 1. Examples of triorthogonal antenna elements

Биортогональные антенны представляют собой ортогональные горизонтальные симметричные вибраторы, способные принимать волну с круговой поляризацией.

В дальнейшем для большей согласованности антенны с принимаемой ЭМВ к биортогональным антеннам присоединили несимметричный вертикальный вибратор. Такие антенны называются триортогональными (рис. 1).

Однако данные антенны имеют существенный недостаток, связанный с различным влиянием Земли на диаграммы направленности в вертикальной плоскости для горизонтальных вибраторов и вертикального несимметричного вибратора [10, 11].

Диаграммы направленности в вертикальной плоскости для горизонтальных симметричных вибраторов и вертикальных несимметричных вибраторов при разном соотношении h/λ приведены на рис. 2, 3.

Таким образом, необходимо использовать антенну, которая минимизирует различие влияния подстилающей поверхности Земли на ортогональные элементы.

Геометрическая модель такой антенны представляет собой 3 несимметричных вибратора (рис. 4). Каждый вибратор образует угол около 35° над подстилающей поверхностью, а в горизонтальной плоскости угол между вибраторами

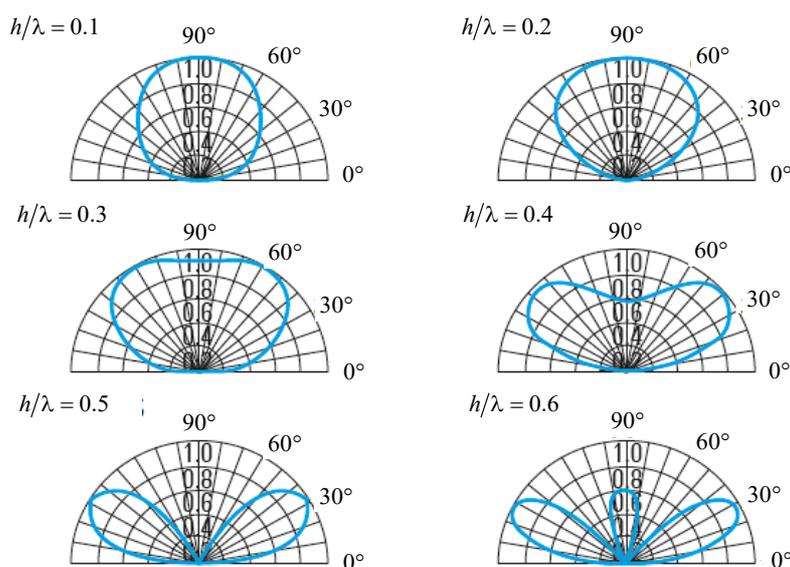


Рис. 2. ДН в вертикальной плоскости для горизонтальных вибраторов

Fig. 2. Directional pattern in the vertical plane for horizontal vibrators

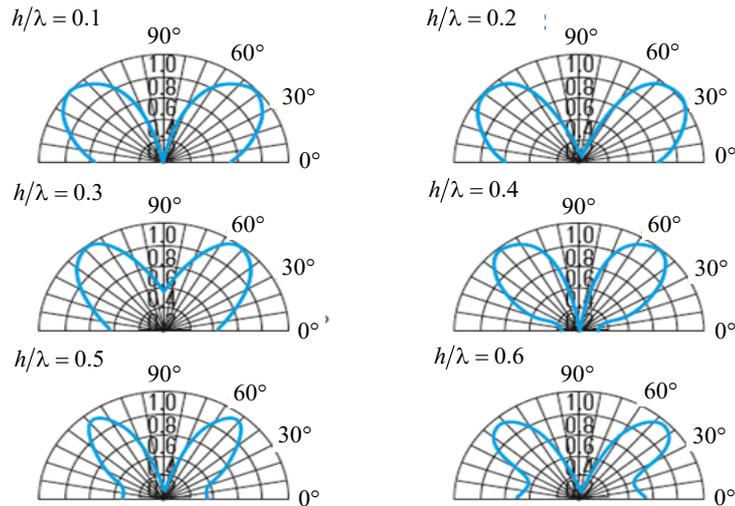


Рис. 3. ДН в вертикальной плоскости для вертикального несимметричного вибратора
 Fig. 3. Directional pattern in the vertical plane for vertical asymmetrical vibrators

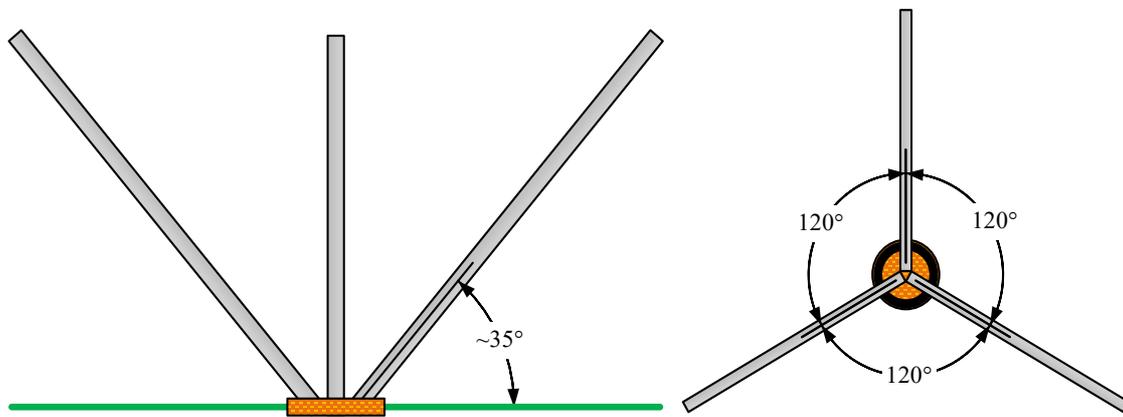


Рис. 4. Геометрическая модель триортогональной антенны
 Fig. 4. Geometric model of the triorthogonal antenna

составляет 120° , чтобы обеспечить ортогональность вибраторов [12, 13].

Таким образом, необходимо смоделировать данный триортогональный элемент, построить его пространственно-поляризационные характеристики и оценить его энергетический выигрыш по сравнению с биортогональной антенной и несимметричным вертикальным вибратором, которые входят в состав современных антенных решеток КВ-диапазона.

Модель поляризационной электромагнитной волны. Радиосигнал КВ-диапазона представляет собой две волны, у которых векторы электрического поля взаимно перпендикулярны. Если предположить, что ЭМВ распространяется вдоль оси x , то эти векторы можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} E_z = E_{0z} \cos(\omega t - kx + \varphi_z), \\ E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kx + \varphi_y), \end{cases} \quad (1)$$

где E_{0z} и E_{0y} – амплитуды ЭМВ; ω – частота сигнала; φ_z и φ_y – начальные фазы при $x = 0$, $t = 0$; k – волновое число.

При $\Omega = \omega t - kx$ выражения (1) можно записать в виде

$$\begin{cases} \frac{E_z}{E_{0z}} = \cos(\Omega + \varphi_z) = \cos \Omega \cos \varphi_z - \sin \Omega \sin \varphi_z, \\ \frac{E_y}{E_{0y}} = \cos(\Omega + \varphi_y) = \cos \Omega \cos \varphi_y - \sin \Omega \sin \varphi_y. \end{cases} \quad (2)$$

Решая систему уравнений (2) относительно $\cos \Omega$ и $\sin \Omega$, возведя обе части решений в

квадрат с последующим сложением полученных выражений, можно получить уравнение

$$\left(\frac{E_z}{E_{0z}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_z}{E_{0z}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\cos\varphi = \sin^2\varphi,$$

где $\varphi = \varphi_z - \varphi_y$ – разность фаз между двумя составляющими ЭМВ.

Данное выражение описывает эллипс поляризации (рис. 5).

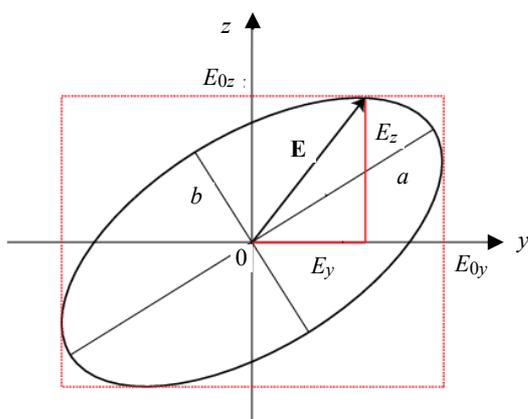


Рис. 5. Эллипс поляризации
 Fig. 5. Polarization ellipse

Суммарный вектор \mathbf{E} с течением времени вращается, тем самым описывая эллипс. Направление вращения вектора \mathbf{E} зависит от знака сдвига фаз между E_z и E_y . Если вектор вращается по часовой стрелке относительно направления распространения волны, то такая поляризация называется эллиптической правого вращения, если против часовой – эллиптической левого вращения.

Важными параметрами для описания типа поляризации являются угол наклона эллипса и коэффициент эллиптичности.

Угол наклона эллипса вычисляется по формуле

$$\operatorname{tg}(2\beta) = \frac{2E_{0z}E_{0y}}{E_{0z}^2 - E_{0y}^2} \cos\varphi.$$

Соответственно, коэффициент эллиптичности равен:

$$\gamma = \frac{b}{a} = \frac{2E_{0z}E_{0y}|\sin\varphi|}{E_{0z}^2 + E_{0y}^2 + \sqrt{(E_{0z}^2 - E_{0y}^2)^2 + 4E_{0z}^2E_{0y}^2\cos^2\varphi}}.$$

Частными случаями эллиптической поляризации выступают линейная и круговая поляризации [14]. Линейная поляризация возникает, когда составляющие E_z и E_y находятся в фазе или противофазе, при этом $\gamma = 0$. Круговая поляризация происходит при равенстве амплитуд составляющих E_z и E_y и сдвиге фаз на $\pm\pi/2$, соответственно $\gamma = 1$.

Математическая модель триортогональной антенны. Математическая модель исследуемой триортогональной антенны была построена в среде программирования MATLAB, в частности, в дополнительном пакете Phased array toolbox.

Данная модель создавалась с помощью встроенной функции phased.ShortDipoleAntennaElement за счет указания координат концов вибратора относительно начальной точки (0, 0, 0) в декартовой системе координат x, y, z [15].

Для первого ортогонального вибратора задавались следующие координаты:

$$\begin{aligned} x &= \cos(0^\circ) \sin(55^\circ) = 0.8192; \\ y &= \sin(0^\circ) \sin(55^\circ) = 0; \\ z &= \cos(55^\circ) = 0.5736. \end{aligned}$$

Для второго:

$$\begin{aligned} x &= \cos(120^\circ) \sin(55^\circ) = -0.4096; \\ y &= \sin(120^\circ) \sin(55^\circ) = 0.7094; \\ z &= \cos(55^\circ) = 0.5736. \end{aligned}$$

Для третьего:

$$\begin{aligned} x &= \cos(240^\circ) \sin(55^\circ) = -0.4096; \\ y &= \sin(240^\circ) \sin(55^\circ) = -0.7094; \\ z &= \cos(55^\circ) = 0.5736. \end{aligned}$$

Трехмерные ДН для каждого ортогонального вибратора представлены на рис. 6.

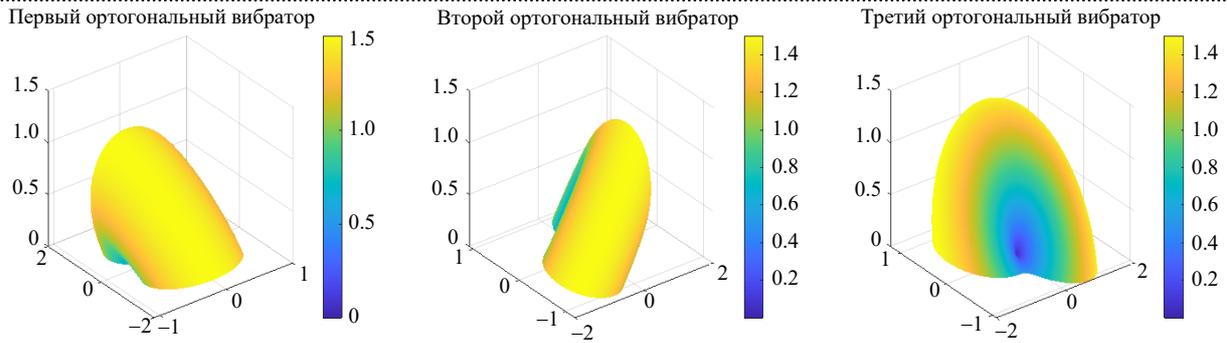


Рис. 6. ДН ортогональных вибраторов, входящих в триортогональный антенный элемент
 Fig. 6. Directional patterns of orthogonal vibrators included in the triorthogonal antenna element

Как видно из рис. 6, диаграммы направленности имеют провалы при некоторых углах прихода, но за счет равномерного расположения вибраторов в азимутальной плоскости суммарная диаграмма направленности моделируемого триортогонального элемента образует всенаправленную ДН без существенных провалов (рис. 7), что обеспечивает идентичный прием сигналов вне зависимости от направления прихода ЭМВ.

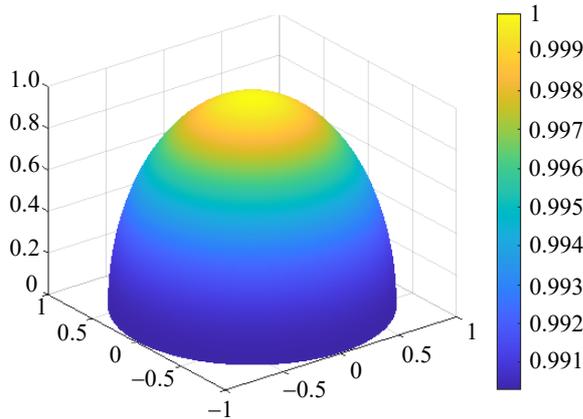


Рис. 7. Суммарная ДН моделируемого триортогонального антенного элемента

Fig. 7. Resultant radiation pattern of the simulated triorthogonal antenna element

Сравнение исследуемого триортогонального антенного элемента с биортогональной антенной и вертикальным несимметричным вибратором. Сравнение антенных элементов выполнялось на основе пространственно-поляризационных характеристик, полученных в ходе математического моделирования в среде MATLAB.

Для создания модели вертикального вибратора использовалась встроенная функция `phased.ShortDipoleAntennaElement`, входящая в состав дополнения `Phased array toolbox`. В параметрах данной функции можно выбрать расположение несимметричного вибратора. Соответственно, для вертикального несимметричного вибратора было выбрано направление вдоль оси z .

В качестве математической модели биортогональной антенны выступали 2 горизонтальных симметричных вибратора, расположенных вдоль осей x и y .

Трехмерные диаграммы направленности несимметричного вертикального вибратора и ортогональных горизонтальных вибраторов изображены на рис. 8.

Само математическое моделирование заключалось в приеме электромагнитной волны с

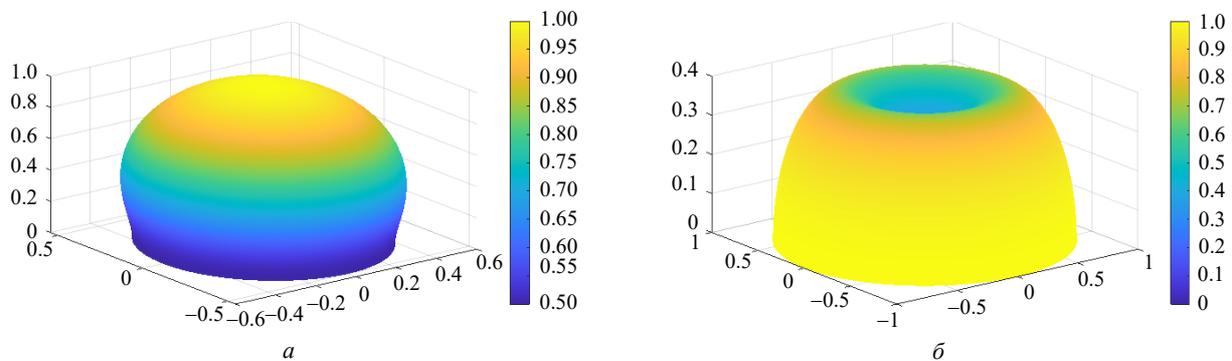


Рис. 8. Трехмерные диаграммы направленности биортогональной антенны (а) и вертикального вибратора (б)

Fig. 8. Three-dimensional radiation patterns of a biorthogonal antenna (a) and a vertical vibrator (b)

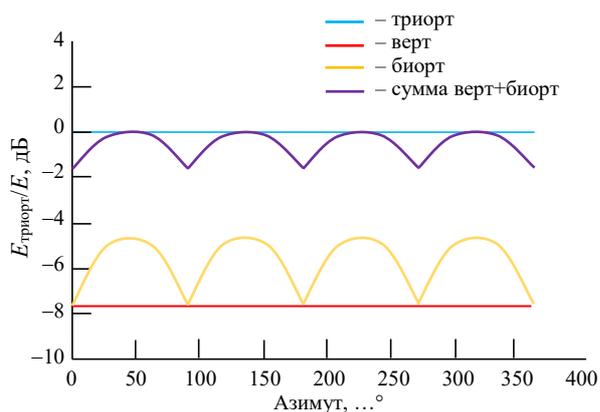


Рис. 9. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при круговой поляризации и угле места 0°

Fig. 9. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with circular polarization at an elevation angle of 0°

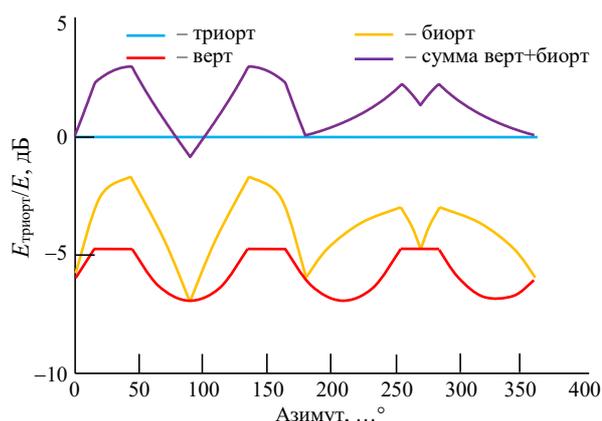


Рис. 10. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при линейной поляризации и угле места 0°

Fig. 10. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with linear polarization at an elevation angle of 0°

линейной и круговой поляризациями антенными элементами, представленными ранее. При этом ЭМВ подавалась с разных азимутальных и зенитных углов.

В итоге формировались зависимости уровня принятого сигнала от азимута при разных углах места для рассматриваемых антенных элементов.

Полученные зависимости представлены на рис. 9–20.

Для исследования приема радиосигналов с круговой и линейной поляризациями в угломестной области был усреднен уровень принятого сигнала сравниваемых антенных элемен-

тов по всей азимутальной плоскости при разных значениях угла места.

Получившиеся зависимости среднего уровня сигнала от угла места при круговой и линейной поляризациях приведены на рис. 21, 22.

Как видно из получившихся пространственно-поляризационных характеристик, при круговой поляризации исследуемая триортогональная антенна на углах места от 0 до 30° дает энергетический выигрыш до 6 дБ по сравнению с биортогональной антенной и 9 дБ относительно несимметричного вертикального вибратора. На углах места от 30 до 60° энергетический выигрыш составляет до 4 и 12.5 дБ

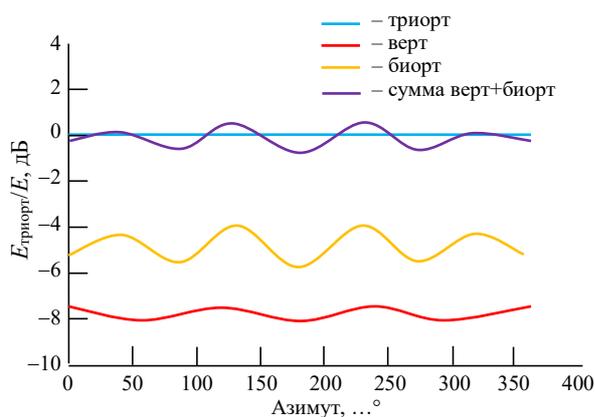


Рис. 11. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при круговой поляризации и угле места 15°

Fig. 11. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with circular polarization at an elevation angle of 15°

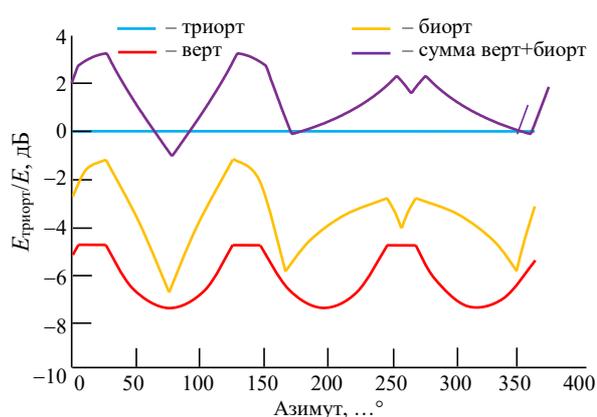


Рис. 12. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при линейной поляризации и угле места 15°

Fig. 12. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with linear polarization at an elevation angle of 15°

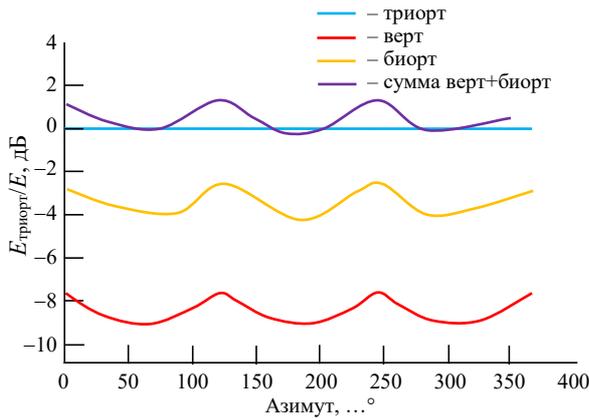


Рис. 13. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при круговой поляризации и угле места 30°

Fig. 13. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with circular polarization at an elevation angle of 30°

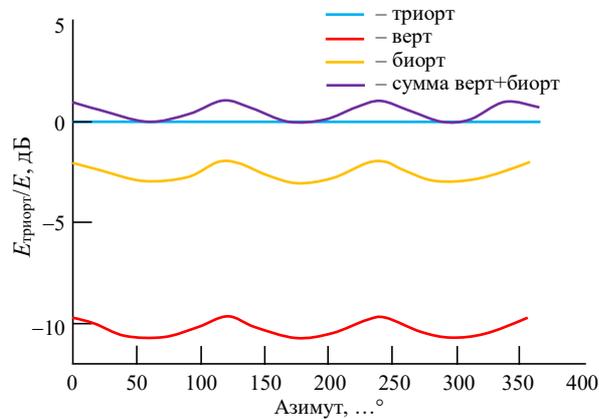


Рис. 15. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при круговой поляризации и угле места 45°

Fig. 15. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with circular polarization at an elevation angle of 45°

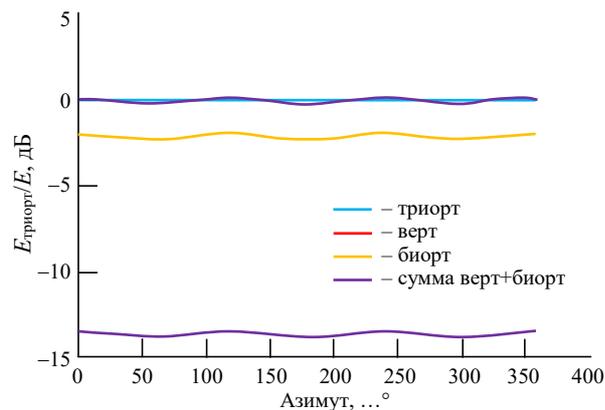


Рис. 17. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при круговой поляризации и угле места 60°

Fig. 17. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with circular polarization at an elevation angle of 60°

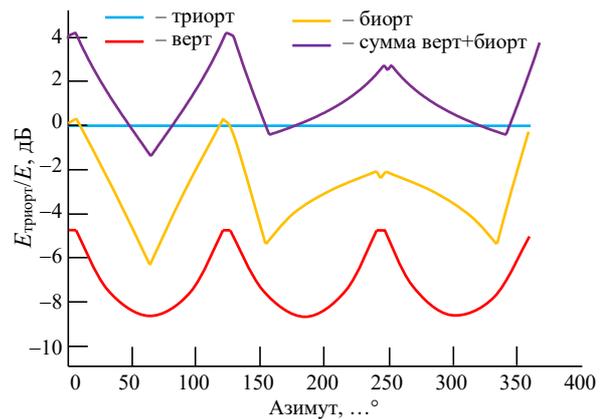


Рис. 14. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при линейной поляризации и угле места 30°

Fig. 14. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with linear polarization at an elevation angle of 30°

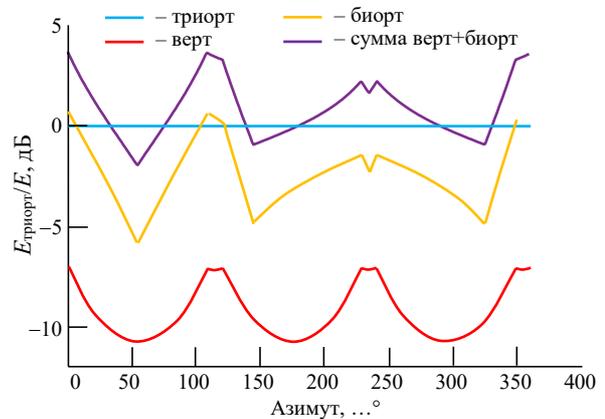


Рис. 16. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при линейной поляризации и угле места 45°

Fig. 16. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with linear polarization at an elevation angle of 45°

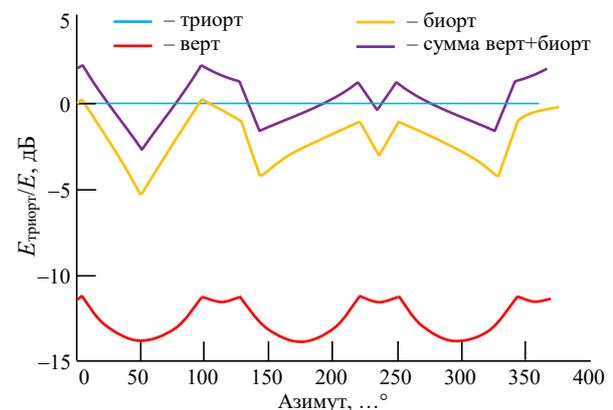


Рис. 18. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при линейной поляризации и угле места 60°

Fig. 18. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with linear polarization at an elevation angle of 60°

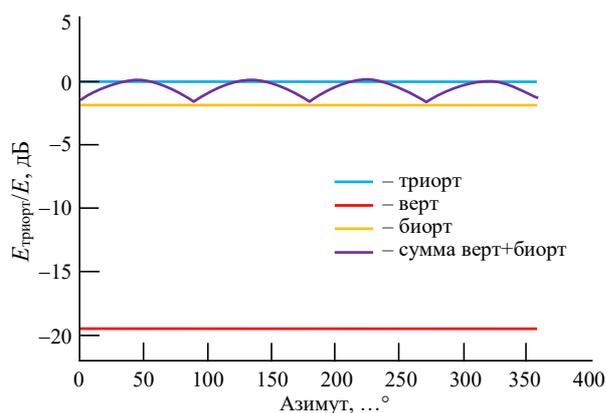


Рис. 19. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при круговой поляризации и угле места 75°

Fig. 19. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with circular polarization at an elevation angle of 75°

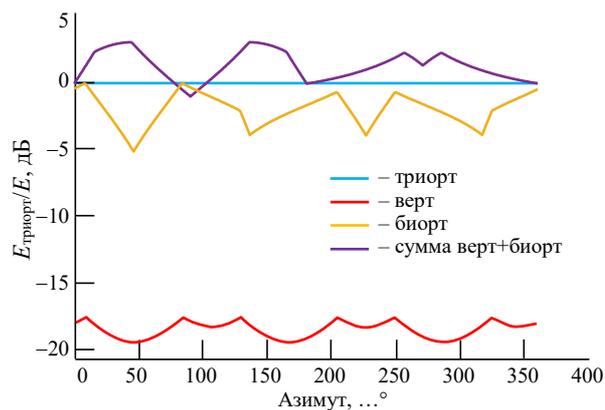


Рис. 20. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при линейной поляризации и угле места 75°

Fig. 20. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with linear polarization at an elevation angle of 75°

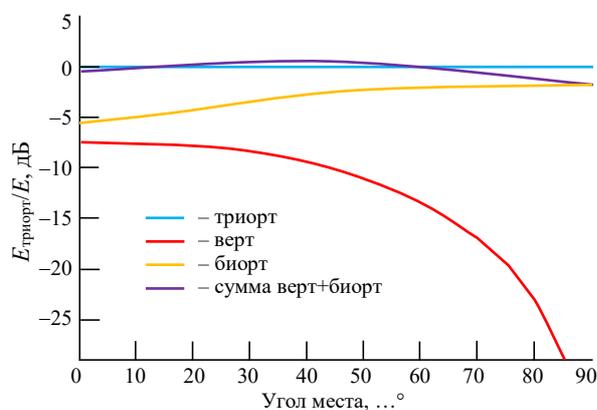


Рис. 21. Зависимость среднего уровня сигнала от угла места при круговой поляризации

Fig. 21. Dependence of the average signal level on the elevation angle with circular polarization

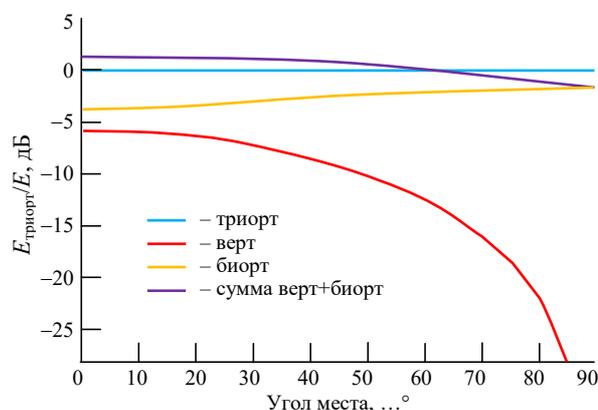


Рис. 22. Зависимость среднего уровня сигнала от угла места при линейной поляризации

Fig. 22. Dependence of the average signal level on the elevation angle with linear polarization

соответственно. Для крутопадающих волн энергетический выигрыш триортогональной антенны над биортогональной антенной сокращается до 2 дБ, в то время как эффективность приема таких волн несимметричным вертикальным вибратором низка. При линейной поляризации, как и в случае круговой поляризации, триортогональная антенна принимает большую энергетику падающей волны. На углах места от 0 до 30° выигрыш составляет до 4.5 дБ относительно биортогональной антенны и до 6.5 дБ по сравнению с несимметричным вертикальным вибратором. На углах места от 30° до 60° принятый сигнал на триортогональную антенну больше на 3 дБ по сравнению с сигналом, принятым биортогональной антенной, и на 12 дБ, чем сигнал на вертикальном вибраторе.

На углах места выше 60° различие между уровнями сигнала на триортогональной и биортогональной антеннах составляет 2 дБ.

Также стоит отметить, что рассматриваемая триортогональная антенна по пространственно-поляризационным характеристикам не уступает триортогональному элементу, состоящему из штыря и двух ортогональных горизонтальных симметричных вибраторов.

Заключение. Рассматриваемая триортогональная антенна позволяет за счет приема обеих составляющих электромагнитного поля повысить качество принятого сигнала на малых углах места – до 4.5 дБ, на углах места от 30° до 60° – до 3 дБ и на углах выше 60° – до 2 дБ по сравнению с биортогональной антенной, а

также благодаря своей конструкции обеспечивает идентичное влияние подстилающей поверхности Земли на диаграммы направленности в вертикальной плоскости ортогональных несимметричных вибраторов, входящих в состав триортогонального антенного элемента.

В итоге исследуемая триортогональная антенна может использоваться в качестве антенного элемента большебазисной антенной ре-

шетки для задач пеленгования и перехвата радиосигналов КВ-диапазона, что в конечном итоге позволит повысить чувствительность и точность пеленгования по сравнению с существующими решетками КВ-диапазона, а также повысить качество перехвата радиосигнала за счет согласованности антенного элемента с поляризацией ЭМВ.

Список литературы

1. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. 2-е изд. М.: Наука, 1972. 564 с.
2. Булатов Н. Д., Савин Ю. К. Статистические характеристики поляризационных замираний КВ сигнала // Электросвязь. 1971. № 2. С. 14–16.
3. Брунелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
4. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 504 с.
5. Коршунов Д. В., Васильев А. С., Лапшин Э. В. Анализ факторов, влияющих на качество радиосвязи в КВ-диапазоне // Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 1–2.
6. Айзенберг Г. З., Белоусов С. П., Журбенко Э. М. Коротковолновые антенны. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1985. 536 с.
7. Компактные приземные антенны для поляризационно-избирательного приема в составе систем радиомониторинга / Д. В. Лучин, А. М. Плотников, А. П. Трофимов, В. В. Юдин // Электросвязь. 2015. № 8. С. 44–48.
8. Лучин Д. В., Сподобаев М. Ю. Системы ДКМВ радиосвязи: разработка, производство и перспективные решения // Вестн. Самарского гос. аэрокосмического ун-та им. академика С. П. Королёва. 2014. № 2 (44). С. 74–79.
9. Афраимович Э. Л. Интерференционные методы зондирования ионосферы. М.: Наука, 1982. 197 с.
10. Пространственно-поляризационная обработка радиосигналов в гиперкомплексном пространстве / И. В. Демичев, Н. П. Шмаков, Р. В. Колесников, А. В. Иванов // Научные технологии. 2018. Т. 19, № 10. С. 25–29.
11. Ротхаммель К., Кришке А. Антенны. Т. 1. 11-е изд. М.: ДМК Пресс, 2005. 416 с.
12. Пат. RU 2649097. Антенна триортогональная / А. В. Иванов, И. В. Демичев, Н. П. Шмаков, Р. В. Колесников. Опубл. 28.11.2016.
13. Демичев И. В., Родин Д. В. Научно обоснованное предложение по технической реализации радиоприемного тракта для регистрации полного вектора электромагнитного поля // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. "Проблемы и основные направления развития радиоэлектроники и образовательного процесса подготовки специалистов радиотехнических систем специального назначения", посвященной 60-летию ЧВВИУРЭ. 2017. № 4. С. 10–14.
14. Канарейкин Д. Б., Павлов Н. Ф., Потехин В. А. Поляризация радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1966. 440 с.
15. Phased Array System Toolbox. URL: <https://docs.exponenta.ru/phased/index.html> (дата обращения 01.04.2023)

Информация об авторе

Грибов Григорий Сергеевич – ассистент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), инженер 2-й категории АО «НИИ "Вектор"». Автор 9 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехника; радиомониторинг; радиопеленгование; цифровая обработка сигналов.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: ggribov@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0005-1338-9187>

References

1. Al'pert Ya. L. *Rasprostranenie ehlektromagnitnyh voln i ionosfera* [Propagation of electromagnetic waves and the ionosphere]. 2nd ed. Moscow, *Nauka*, 1972, 564 p. (In Russ.)
2. Bulatov N. D., Savin Yu. K. Statistical characteristics of polarization fading of the HF signal. *Elektrosvyaz*. 1971, no. 2, pp. 14–16. (In Russ.)
3. Bryunelli B. E., Namgaladze A. A. *Fizika ionosfery* [Physics of Ionosphere]. Moscow, *Nauka*, 1988, 528 p. (In Russ.)

4. Davies K. *Radiovolny v ionosfere* [Ionospheric Radio Waves]. Moscow, *Mir*, 1973, 504 p. (In Russ.)
5. Korshunov D. V., Vasil'ev A. S., Lapshin E. V. Analysis of Factors Affecting the Quality of Radio Communication in the HF Band. *Nadezhnost' i kachestvo*. 2018, vol. 2, pp. 1–2. (In Russ.)
6. Aizenberg G. Z., Belousov S. P., Zhurbenko E. M. *Korotkovolnovye anteny* [Shortwave Antennas]. 2nd ed. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1985, 536 p. (In Russ.)
7. Luchin D. V., Plotnikov A. M., Trofimov A. P., Yudin V. V. Compact Ground-Level Antennas for Polarization-Selective Reception as Part of Radio Monitoring Systems. *Electrosvyaz'*. 2015, no. 8, pp. 44–48. (In Russ.)
8. Luchin D. V., Spodobaev M. Yu. DHMW Radio Communication Systems: Development, Production and Advanced Solutions. *Vest. Samarskogo gos. aerokosmicheskogo un-ta im. akademika S. P. Koroleva*. 2014, no. 2 (44), pp. 74–79. (In Russ.)
9. Afraimovich E. L. *Interferentsionnye metody zondirovaniya ionosfery* [Interference Methods of Ionosphere Sounding]. Moscow, *Nauka*, 1982, 197 p. (In Russ.)
10. Demichev I. V., Shmakov N. P., Kolesnikov R. V., Ivanov A. V. Spatial Polarization Processing Of Radio Signals in Hypercomplex Space. *Naukoemkie tehnologii*. 2018, vol. 19, no. 10, pp. 25–29. (In Russ.)
11. Rothammel' K., Krishke A. *Antenny* [Antennas]. 11th ed. Moscow, *DMK press.*, 2005, 416 p. (In Russ.)
12. Ivanov A. V., Demichev I. V., Shmakov N. P., Kolesnikov R. V. Triorthogonal Antenna. Pat. RU. 2649097. Publ. 28.11.2016. (In Russ.)
13. Demichev I. V. The Scientifically-Based Proposal for the Technical Implementation of a Radio Receiving Path for Recording the Full Vector of the Electromagnetic Field. Proc. of the All- Russ. scientific and practical conf. "Problems and Main Directions of Development of Radio Electronics and the Educational Process of Training Specialists of Radio Engineering Systems for Special Purposes", dedicated to the 60th anniversary of PMVIURE. 2017, no. 4, pp. 10–14. (In Russ.)
14. Kanareykin D. B., Pavlov N. F., Potekhin V. A. *Polarizatsiya radiolokacionnykh signalov* [Polarization of Radar Signals]. Moscow, *Sov. Radio*, 1966, 440 p. (In Russ.)
15. Phased Array System Toolbox. Available at: <https://docs.exponenta.ru/phased/index.html> (accessed 01.04.2023)

Information about the author

Grigory S. Gribov, Postgraduate Student of the Department of Radio Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University, engineer of the 2nd category of JSC "Research Institute "Vector"". The author of 9 scientific publications. Area of expertise: radio engineering; radio monitoring; radio direction finding; digital signal processing. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: ggribov@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0005-1338-9187>

Исследование возобновляемого потенциала Республики Армения при реализации гибридной автономной системы энергоснабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей солнечного света

Н. Р. Костик ^{1✉}, С. А. Тарасов ¹, Г. Е. Айвазян ²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Армения

✉ nrkostik@etu.ru

Аннотация

Введение. Фотовольтаика является одной из лидирующих отраслей возобновляемой энергетики. Наибольшее распространение фотовольтаика получила в использовании фотоэлектрических преобразователей для создания гибридных автономных систем электрификации, поскольку фотовольтаика не привязана к конкретным факторам и может быть применена практически повсеместно.

Цель работы. Определение потенциала метеорологических и географических особенностей Республики Армения для внедрения автономных гибридных систем возобновляемых источников энергии (АГСВИЭ) с использованием фотоэлектрических преобразователей солнечного света. Моделирование условий эксплуатации различных конфигураций АГСВИЭ для снабжения электроэнергией базовой станции сотовой связи (БССС). Оптимизация и анализ технико-экономических параметров оптимальных конфигураций.

Материалы и методы. Исследуются климатические, географические, социальные и экономические особенности Республики Армения. Выполняется оценка регионов с высоким потенциалом для внедрения АГСВИЭ и сравнение результатов с исследованиями, проведенными комитетом энергоэффективности Effergy-irsolav. Осуществляется подбор компонентов на основе потребительской нагрузки БССС для моделирования системы автономного гибридного энергоснабжения и непосредственное моделирование условий эксплуатации АГСВИЭ при помощи программного обеспечения HOMER Pro для последующего анализа технической и экономической эффективности внедряемой АГСВИЭ в регионе рядом с населенным пунктом Тцовинар.

Результаты. Были получены 10 основных разновидностей конфигураций АГСВИЭ. Наиболее эффективной является конфигурация В1, со стоимостью энергии 0.322 \$/кВт·ч, компонентами которой являются массив солнечных элементов общей мощностью 4.5 кВт, 12 В аккумуляторных батарей емкостью 100 А·ч, дизельная генераторная установка мощностью 3 кВт. Основными критериями эффективности являются низкие экономические затраты на реализацию и процесс эксплуатации данной конфигурации АГСВИЭ. Дополнительные варианты АГСВИЭ были смоделированы с целью оптимизации компонентной базы конфигурации АГСВИЭ.

Заключение. В ходе проведенного исследования и моделирования условий эксплуатации было выявлено, что в зависимости от потребительской нагрузки солнечные фотопреобразователи ограничены и могут выступать как вспомогательный источник электроэнергии. Использование реального профиля потребительской нагрузки в виде БССС позволило охватить максимально широкий диапазон конфигураций компонентной базы, что свидетельствует о высокой точности результатов моделирования и, как следствие, технико-экономических результатов исследования.

Ключевые слова: фотовольтаика, солнечная энергетика, возобновляемые источники энергии, автономные системы энергоснабжения

Для цитирования: Костик Н. Р., Тарасов С. А., Айвазян Г. Е. Исследование возобновляемого потенциала Республики Армения при реализации гибридной автономной системы энергоснабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей солнечного света // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 106–122. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-106-122

Источник финансирования. Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE-2020-0008, который выполнялся в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 14.02.2023; принята к публикации после рецензирования 24.05.2023; опубликована онлайн 28.09.2023



Study of Renewable Potential of the Republic of Armenia for Implementation of Hybrid Autonomous Power Supply System Using Solar Photovoltaic Modules

Nikita R. Kostik^{1✉}, Sergey A. Tarasov¹, Gagik Ye. Ayvasyan²

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia

✉ nrkostik@etu.ru

Abstract

Introduction. Solar energy is one of the leading renewable energy industries. Solar photovoltaic modules are most widely used to create hybrid autonomous electrification systems, since photovoltaics are not limited to specific limitations and can be applied almost everywhere.

Aim. To determine the potential of meteorological and geographical features of the Republic of Armenia for the implementation of autonomous hybrid renewable energy sources systems (AHRESS) using solar photovoltaics (PV). To simulate operating conditions for various AHRESS configurations providing electric power to a cellular communication base station.

Materials and methods. Climatic, geographical, social and economic features of the region of the Republic of Armenia are investigated. Regions are evaluated based on the key factors of AHRESS implementation potential and compared with studies performed by the Effergy-Irsolav. The simulations and technical and economic analysis were performed using the HOMER Pro software in Ttsovinar region.

Results. The most efficient configuration is found to be B1, with an energy cost of 0.322 \$/kW·h. The parameters of winning system: PV array with capacity of 4.5 kW, 12V battery with 100 A·h capacity, diesel generator with 3 kW capacity. The main efficiency criterion is the low economic costs for the implementation and operation of this AHRESS configuration. Ten additional variants of AHRESS were modeled in order to optimize the component base of the configuration.

Conclusion. It was found that, depending on the consumer load, solar photovoltaic converters are limited and can only perform as supporting source of electricity. The use of the existing consumption load profile in the form of BSSS made it possible to cover the widest possible range of configurations of the component base, which indicates the high accuracy of the simulated results and, as a result, the technical and economic relevance of the study.

Keywords: photovoltaics, solar energy, renewable energy sources, autonomous power supply systems

For citation: Kostik N. R., Tarasov S. A., Ayvasyan G. Ye. Study of Renewable Potential of the Republic of Armenia for Implementation of Hybrid Autonomous Power Supply System Using Solar Photovoltaic Modules. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 106–122. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-106-122

Acknowledgments. The study was carried out as part of project No.FSEE-2020-0008, which was carried out as part of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 14.02.2023; accepted 24.05.2023; published online 28.09.2023

Введение. Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) позволяет не только снизить нагрузку на основную энергетическую сеть, обеспечить устойчивое энергетическое развитие государства, но благодаря диверсификации источников энергии снизить зависимость от внешних факторов, например политических [1]. Также с диверсификацией связано возможное снижение себестоимости генерации элект-

троэнергии, что в дальнейшем позволяет создать условия для интеграции страны в электроэнергетические коридоры [2].

В [3] можно наблюдать, как изменяется распределение в энергетическом балансе Республики Армения: уголь и нефть, а также нефтепродукты все реже используются для генерации электроэнергии. Доля использования газа возрастает до 70%. Больше внимания

Исследование возобновляемого потенциала Республики Армения при реализации гибридной автономной системы энергоснабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей солнечного света
Study of Renewable Potential of the Republic of Armenia for Implementation of Hybrid Autonomous Power Supply System Using Solar Photovoltaic Modules

начинает уделяться ВИЭ (в том числе гидро-энергии) и "мирному атому" [3, 4]. Также автор упоминает о мерах правительства Армении, направленных на модернизацию производств, которая, в свою очередь, направлена на снижение энергопотребления. В этом плане Армения имеет определенные успехи, которые выражаются в удельном потреблении электроэнергии на душу населения на уровне $3.6 \text{ МВт} \cdot \text{ч/чел.}$, в сравнении с среднесоюзным уровнем в $5.5 \text{ МВт} \cdot \text{ч/чел.}$ [3]. Тем не менее в энергетическом балансе Республики Армении все еще преобладает топливная технология – более 85 % энергии вырабатывается именно с ее помощью.

Республика Армения обладает также высоким возобновляемым потенциалом. Приход солнечной энергии за год на поверхность земли здесь в два раза больше, чем в Европе, и составляет $1720 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2$ [4]. Малая площадь страны и большой процент пахотных земель ограничивают возобновляемый потенциал. В ближайшие 15 лет правительство планирует увеличение доли солнечной энергии с 1 до 10 % – это максимум территориальных возможностей. Доля солнечных электростанций (СЭС) в структуре внутреннего потребления составила 10 % к 2022 г. [5]. Совместно с Европейским банком реконструкции и развития в Армении начались подготовительные работы по строительству пяти СЭС общей мощностью 120 МВт [6]. Также правительством республики была одобрена инвестиционная программа компании Masdar (ОАЭ) по строительству СЭС общей мощностью 400 МВт в Арагацотнской и Котайкской областях Армении [7–11]. Таким образом, можно утверждать, что отрасль возобновляемой, в частности солнечной, энергетики является перспективным развивающимся направлением, которое способно не только привлечь инвестиции, но и способствовать решению социально-экономических аспектов.

В то же время солнечная энергетика обладает значительным недостатком – это прямая зависимость мощности СЭС от площади массива солнечных элементов. Данный факт может играть решающую роль в условиях ограниченности площадей, пригодных для размещения фотовольтаических (Photovoltaic – PV) модулей. Однако, если рассматривать комбинированный

подход к использованию доступных земельных ресурсов в виде применения технологии агровольтаики, возможно, удастся повысить эффективность занимаемого пространства [12].

Исходя из распределения общего солнечного излучения, максимум излучения сосредоточен на южных склонах горного рельефа. Данная местность частично электрифицирована, однако полная электрификация этих районов может быть затруднительна. Поэтому автономные гибридные системы на основе ВИЭ могут быть рассмотрены в качестве альтернативы подключению к сети энергоснабжения.

Материалы и методы. Станции на основе фотовольтаики обладают наибольшей эффективностью при соответствии как минимум одному из перечисленных критериев: локация обладает достаточным уровнем солнечной иррадиации, локация не располагает более доступными и эффективными способами снабжения потребительской нагрузки, размещение массива солнечных модулей может быть реализовано с учетом особенностей рельефа, территория не является запрещенной для размещения ВИЭ зоной (аэропорты, заповедники, центральные площади городов и т. д.). В зависимости от назначения и поставленных целей перед СЭС значимость критериев может изменяться, однако данные условия являются ключевыми при выборе места размещения СЭС [13].

В исследовании была выбрана локация рядом с населенным пунктом Тцовинар. Выбор обусловлен достаточной удаленностью от сетей энергоснабжения, высокими параметрами инсоляции, пиковые значения которой достигают $6 \text{ кВт/м}^2/\text{день}$, и рельефом, пригодным для установки массива солнечных элементов. Выдвинутое предположение также подтверждается исследованием, проведенным Effergy Irsolav [7–11], в рамках которого была выполнена оценка возобновляемого потенциала Республики Армении. Исследование было сосредоточено на повышении уровня знаний о возобновляемом потенциале, составлении базы данных и солнечных атласов, с использованием информации о климатологических параметрах региона со спутников. На основе данных со спутников была построена модель с применением нейронных



Рис. 1. Распределение ресурса солнечной энергии в Республике Армения

Fig. 1. Solar energy resource yield map of Republic of Armenia

сетей для оценки распределения инсоляции на территории республики за 2000–2016 гг. С использованием полученной теоретической информации были построены солнечные атласы региона (рис. 1), затем были апробированы данные и начата кампания по сбору и анализу экспериментальных данных солнечного излучения, достигающего поверхности, при помощи 5 метеорологических станций, размещенных в максимально различающихся локациях. В соответствии с результатами анализа экспериментальных данных за 4 месяца были внесены корректировки в оценку возобновляемого потенциала и сформирован отчет о возобновляемом потенциале и перспективных регионах Республики Армения, пригодных для размещения СЭС [14]. На основе данного исследования можно подтвердить предположение авторов статьи о высоком возобновляемом потенциале района населенного пункта Тцовинар [10, 11].

Моделирование условий эксплуатации СЭС. Оптимальные решения по использованию ВИЭ в Армении анализируются с использованием метода компьютерного моделирования с помощью программного обеспечения

HOMER Pro. Процесс моделирования основывается на исследовании периода окупаемости системы (Payback Period), чистой приведенной стоимости (Net Present Cost – NPC) и выбросов загрязнений для каждого сценария. Процесс моделирования можно разделить на три части: определение входных данных, анализ результатов каждого сценария и обоснование выходных результатов.

1. *Определение входных данных.* Входная информация собирается из общедоступных источников. Входными данными является информация о климатических параметрах региона, структура энергопотребления в регионе, капитальные затраты на систему (Capital Cost), стоимость установки, стоимость обслуживания и сведения о выбранном местоположении.

2. *Моделирование каждого сценария.* Собранная информация была введена в программу HOMER для последующего моделирования. Моделирование проводилось для различных сценариев в зависимости от потребления электроэнергии, комбинации используемых технологий ВИЭ и типа системы. На основе входных

данных был осуществлен подбор соответствующих компонентов системы ВИЭ:

$$NPC = \sum_{t=25 \text{ лет}}^{\text{Компоненты}} \frac{R_t}{(1+i)^t}, \quad (1)$$

где t – период эксплуатации системы; R_t – общие затраты за эксплуатационный период системы; i – средства, которые возможно вернуть в процессе эксплуатации (продажа электроэнергии, сдача оборудования в аренду, продажа компонентов, сдача в переработку и т. д.).

Один из основных экономических показателей – приведенная стоимость – был рассчитан в программе HOMER Pro по (1).

3. *Анализ результатов.* После моделирования были проанализированы технико-экономические параметры систем, чтобы выбрать лучшую инвестиционную стратегию для использования ВИЭ в рассматриваемом регионе.

Описание методологии определения параметров системы. Местоположение определяется параметрами широты и долготы, что позволяет приложению загружать годовые профили освещенности (рис. 2–4), скорости ветра и температуры. Агрегированный профиль нагрузки создается в соответствии с измерениями мощности, выполненными в локальных элементах микросети (например, в зданиях). Могут быть добавлены некоторые вариации в отношении суточного и часового потребления

электроэнергии, но не более 10%. Вместе с определением объекта и нагрузки генераторы и электросеть рассматриваются в качестве энергоресурсов, включая интерфейсы питания, связанные с каждым генератором. На данном этапе рассматривается информация о возможных ограничениях по выработке электроэнергии, а также капитальные затраты и затраты на техническое обслуживание. Эти данные должны быть максимально точными, так как от них напрямую зависит тип и количество источников энергии.

В качестве энергетической поддержки добавляются системы хранения с конкретными техническими и экономическими параметрами. Без дополнительных ограничений велика вероятность того, что параметры некоторых компонентов не соответствуют коммерческим спецификациям или целочисленным значениям. Дополнительно некоторые дискретные расчетные параметры (например, количество фотоэлектрических панелей или батарей) необходимо ограничить техническими возможностями и доступной площадью. Фактически большинство автономных систем энергоснабжения требуют согласования требований потребителя энергии и источников электроэнергии по напряжению или току, в соответствии с используемым типом подключения и разновидностями компонентов системы.

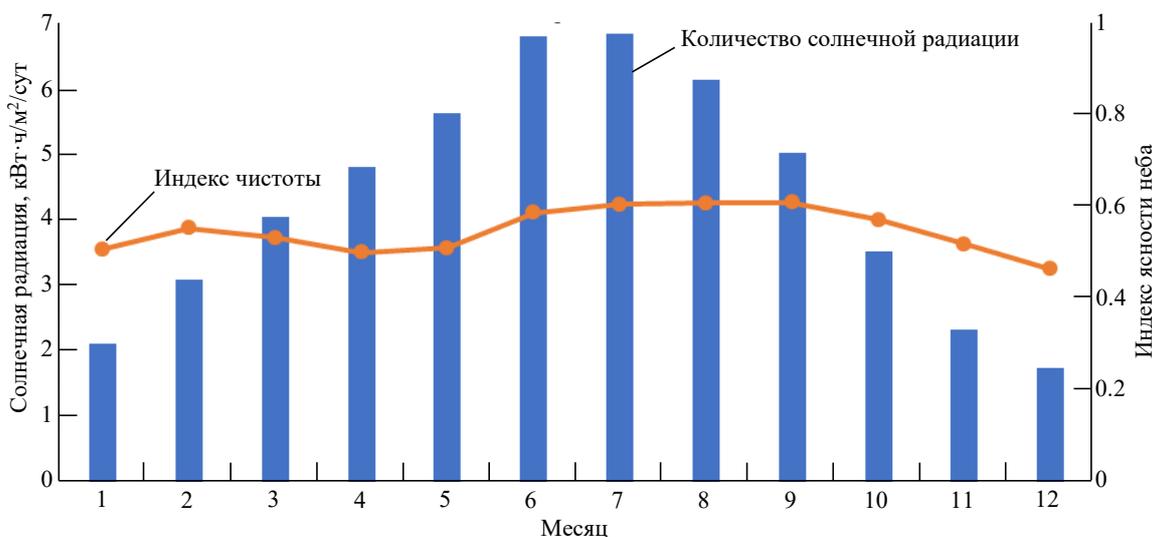


Рис. 2. Распределение глобального горизонтального солнечного излучения (GHI) в Талине

Fig. 2. Global horizontal irradiance distribution in Talin

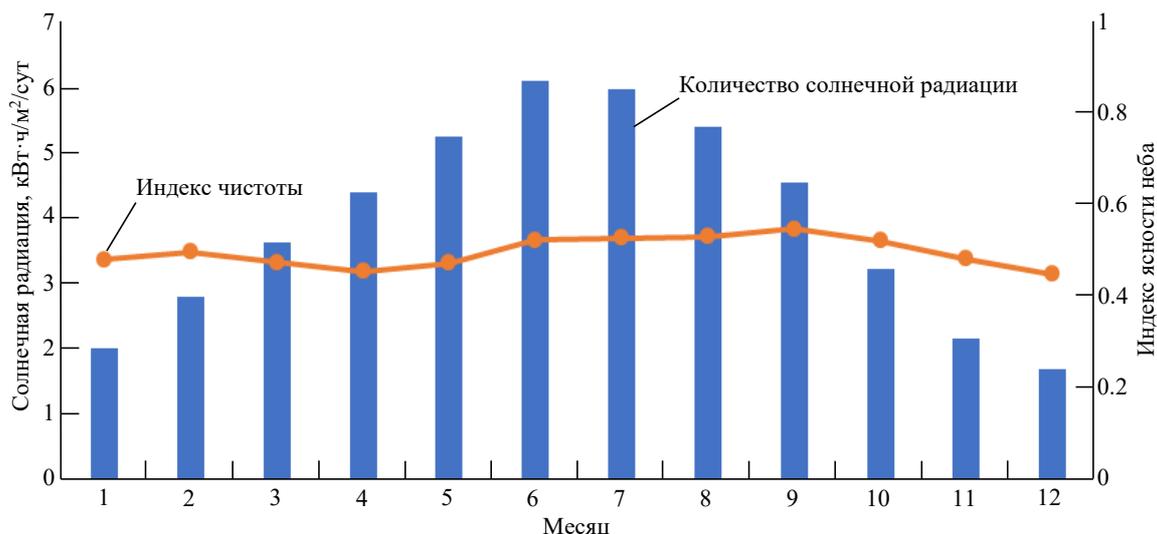


Рис. 3. Распределение глобального горизонтального солнечного излучения (GHI) в населенном пункте Тцовинар
 Fig. 3. Global horizontal irradiance distribution in Tsovinar

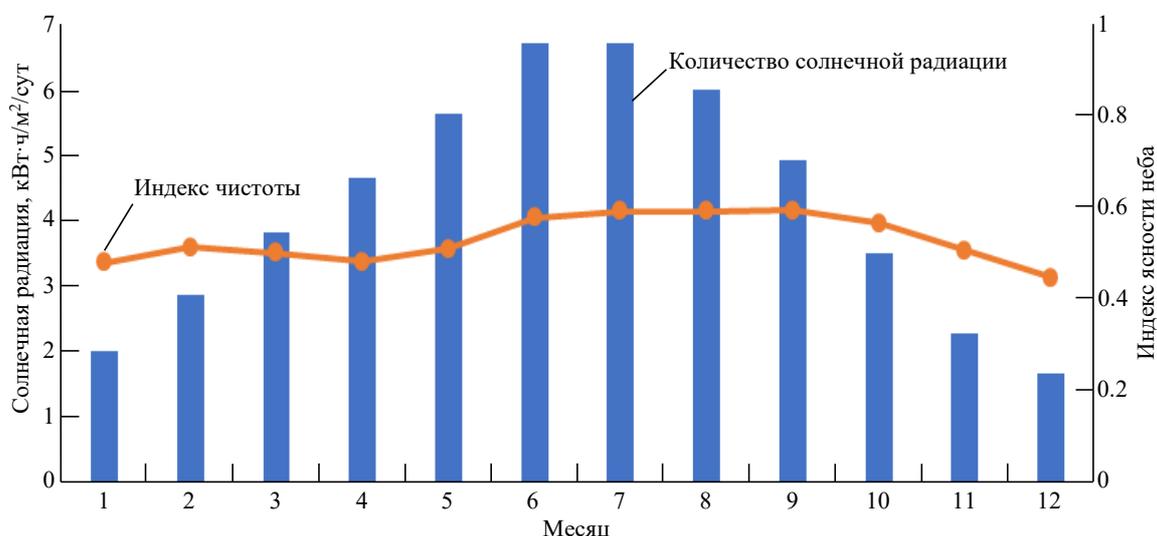


Рис. 4. Распределение глобального горизонтального солнечного излучения (GHI) в Ереване
 Fig. 4. Global horizontal irradiance distribution in Yerevan

HOMER Pro требует в качестве входных экономических данных капитальные затраты на реализацию, затраты на техническое обслуживание, замену и эксплуатационные расходы для каждого компонента: генераторов, накопителей энергии и элементов питания. Кроме того, требуется указать срок жизни проекта, ставку дисконтирования, уровень инфляции и другие экономические параметры. Затраты и экономические параметры используются для расчета NPC для проекта на весь срок службы, что является одним из основных критериев оптимизации для рационального выбора параметров компонентов. Чистая приведенная стоимость (NPC), которая, другими словами, является стоимо-

стью всего жизненного цикла системы, рассчитывается по (1).

По сути, NPC является функцией мощности компонентов, стоимости и экономических параметров, которая представляет собой сложную, нелинейную и смешанную целочисленную функцию. Чистая приведенная стоимость минимизируется с помощью инструмента оптимизации HOMER, в результате получается наиболее оптимальная конфигурация гибридной системы ВИЭ.

Другим немаловажным показателем является стоимость энергии (Cost of Energy – COE), которая выражается в \$/кВт·ч и сопоставима с платой за электроэнергию при покупке энер-

гии. Этот показатель можно использовать для оценки экономической целесообразности гибридной системы ВИЭ по сравнению с обычными традиционными источниками электричества, такими как электросеть или дизельные электростанции:

$$\text{COE} = \frac{\text{CRF}(i, t) \cdot \text{NPC}}{E_{\text{served}}}, \quad (2)$$

где CRF – коэффициент восстановления платежеспособности; i – годовая учетная ставка; t – эксплуатационный период системы; E_{served} – количество энергии для покрытия нагрузки в течение года.

Пример расчета. *Определение расположения и сбор данных.* Каждый сценарий был разработан с учетом потребностей в энергии, местоположения, климатических особенностей и доступного пространства для размещения станции. Населенные пункты были выбраны исходя из удаленности от сетей электроснабжения: Ереван как наименее удаленный населенный пункт, являющийся социально-экономическим центром региона; населенный пункт Тцовинар как наиболее удаленный пункт в сложной местности; Талин в качестве среднего по показателям удаленности пункта. Климатологические данные о температуре и солнечном излучении берутся из базы данных НАСА, являющейся информационной системой, к которой обращается HOMER Pro.

Исходя из климатического анализа и оценки возобновляемого потенциала в регионе, было принято решение о моделировании условий эксплуатации условного объекта, находящегося в районе села Тцовинар. Данный регион демонстрирует средний по Республике Армении социально-экономический показатель плотности населения и предпочтителен для внедрения гибридных систем энергоснабжения.

Нагрузка. Стоимость электроэнергии, произведенной рассматриваемой системой, рассчитывается по (2). В качестве потребительской нагрузки в работе выступает базовая станция сотовой связи (БССС). Данный объект предпочтителен для рассмотрения, поскольку может выступать в качестве сетевого и автономного потребителя энергии. На рис. 5 изображен график потребительской нагрузки типовой базовой сотовой станции. Основные параметры работы БССС:

- постоянное напряжение 48 В;
- наличие малой аккумуляторной батареи (АКБ) емкостью 100 А · ч;
- режим работы: вероятность потери нагрузки (loss of load probability – LOLP).

Параметры тока в течение дня варьируются между 52 и 58 А. Как видно из графика, минимальный ток наблюдается в послеполуночные периоды (с 2:00 до 8:00): ток принимает минимальное значение 51.85 А. Максимум тока при-

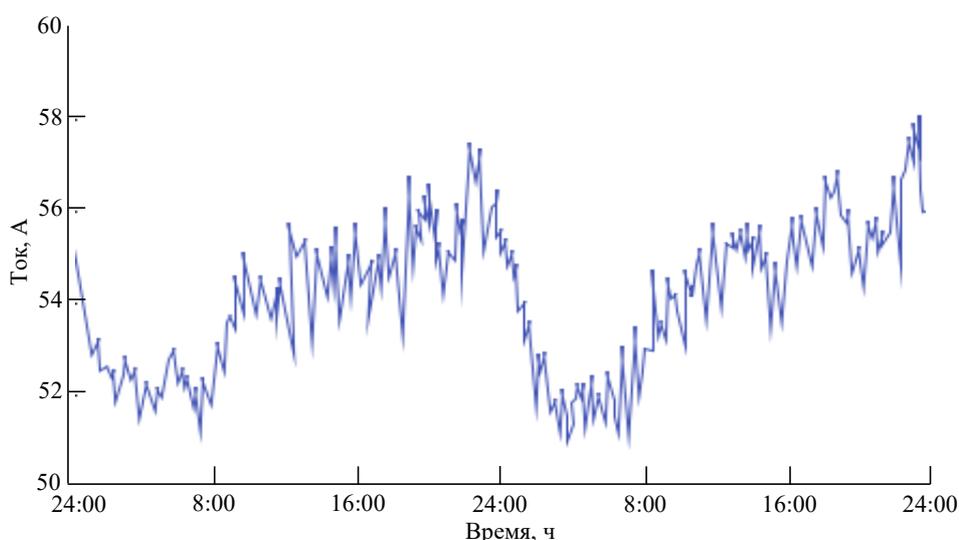


Рис. 5. Среднесуточное энергопотребление базовой станции сотовой связи 15–16 декабря 2022 г.

Fig. 5. Daily average energy consumption of cell phone base station on 15–16 of December 2022

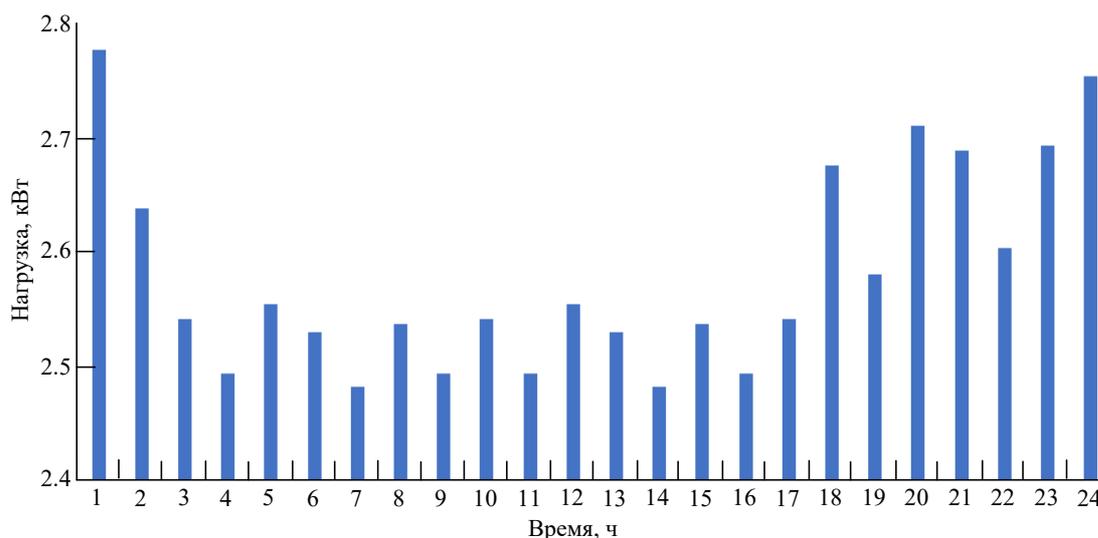


Рис. 6. Профиль потребительской нагрузки базовой станции сотовой связи

Fig. 6. Daily energy consumption load profile of cell phone base station

ходится на вечернее время: с 16:00, с небольшими просадками, значения тока стремятся к максимуму – 58 А.

Для приближения моделирования к реальным условиям эксплуатации в профиль нагрузки были внедрены случайные временные и суточные изменчивости значения нагрузки в пределах 2 %. Исходя из вышеописанных данных можно составить профиль нагрузки в HOMER Pro. На рис. 6 изображен профиль нагрузки, использованный при моделировании условий эксплуатации.

Максимум нагрузки составляет около 2.9 кВт, среднее значение мощности составляет 2.58 кВт, в то время как среднесуточное потребление энергии достигает значения 61.98 кВт · ч/день.

Конфигурация системы.

1. Система накопления энергии. Предпочтительным вариантом накопителя энергии для потребителей среднего напряжения являются аккумуляторные батареи из-за соотношения стоимости и эффективности. Особенно предпочтительны АКБ глубокого разряда, эффективность и срок службы которых практически не снижаются в течение жизненного цикла. Наиболее распространены свинцово-кислотные и литий-ионные аккумуляторы. Основным преимуществом литий-ионных аккумуляторов является более высокая эффективность к концу срока службы (78 % по сравнению с 70 % свинцово-кислотных аккумуляторов), а также более высокая плотность энергии. Однако их стоимость

более чем вдвое превышает стоимость свинцово-кислотных аккумуляторов. Для минимизации начальных затрат и снижения стоимости электроэнергии в исследовании был выбран свинцово-кислотный 12 В АКБ емкостью 100 А · ч.

2. PV-преобразователи. Для максимальной выработки электроэнергии при помощи солнечных фотопреобразователей необходимо учитывать изменение положения солнца в течение года. Наиболее эффективным является изменение угла наклона солнечных панелей каждый месяц. В случае отсутствия возможности изменять угол наклона панелей необходимо выбрать оптимальный угол, который бы позволил максимизировать выработку в любое время года. Для нахождения оптимального угла наклона используются данные о местоположении объекта (долгота, широта), времени года (количество дней с начала года), высота над уровнем моря и азимут рассматриваемой локации. В работе был рассмотрен угол наклона солнечных панелей 43° как наиболее оптимальный для падающего на поверхность ФЭП-элемента солнечного излучения в течение всего года в рассматриваемом регионе. Технико-экономические характеристики используемых в моделировании солнечных элементов взяты в виде усредненных технических параметров моделей, представленных на рынке в пределах одной ценовой категории (табл. 1).

3. Инвертор необходим для эффективного соединения источников переменного (в виде

Табл. 1. Технические параметры солнечного модуля
 Tab. 1. Technical parameters of photovoltaic module

Параметр	Значение
Угол наклона массива солнечных панелей	43°
Коэффициент отражения поверхности земли	20 %
Температурный коэффициент мощности	-0.3 %/°C
Номинальная рабочая температура	38.8 °C
Ток в рабочей точке (I_{mp})	8.86 А
Напряжение в рабочей точке (V_{mp})	36.74 В
Ток короткого замыкания (I_{sc})	9.4 А
Напряжение холостого хода (V_{oc})	44.1 В

дизельного генератора или сети) и постоянного тока (в виде PV-модулей).

4. *Дизельный генератор.* Исходя из непостоянства генерации при помощи PV-элементов, в работе возникла необходимость в дополнительном источнике энергии. В качестве такого источника был выбран дизельный генератор мощностью 3.0 кВт (исходя из минимальной потребительской нагрузки). Стоимость 1 л дизельного топлива в Республике Армения была взята 1.07 \$ (по состоянию на 20.01.2023).

Результаты. Финальная конфигурация рассматриваемой системы представлена в табл. 2. В ходе моделирования HOMER Pro смоделировала 4348 вариантов комбинации компонентов системы с различными параметрами, из них 1478 вариантов были отсеяны в связи с низкими показателями энергетической и экономической эффективности. Оценка энергетического потенциала осуществлялась из условия способности компонентов гибридной системы

обеспечить выработку для закрытия установленной потребительской нагрузки. Экономическая эффективность оценивалась исходя из наименьшей приведенной стоимости (NPC) конфигурации системы и наименьшей стоимости электроэнергии (Levelized Cost of Energy – LCOE) в рассматриваемой. Оптимальная система состоит из следующих компонентов: массив PV-элементов мощностью 4.5 кВт; дизельный генератор мощностью 3 кВт; инвертор 4 кВт и АКБ 12 В 100 А · ч. Исходя из результатов, представленных в табл. 3, видно, что вклад ВИЭ можно увеличить, расширив массив солнечных панелей. Однако фокусировка на расширении солнечного массива ведет к увеличению затрат на строительство и эксплуатацию системы. С ростом мощности солнечного массива (B2–B5) увеличивается и избыточная генерируемая энергия, что вызвано ограничением системы накопления электроэнергии. Таким образом, растет и избыток электроэнергии, генерируемый ВИЭ.

Табл. 2. Компоненты рассматриваемой системы и их параметры
 Tab. 2. Components and parameters of the simulated system

Компонент	Стоимость, \$/кВт	Стоимость замены, \$/кВт	Стоимость обслуживания, \$/кВт/год	Срок службы, лет	Эффективность, %
PV-модуль	250.0	250.0	0	25.0	90.0
Дизельный генератор	200.0	200.0	0.001	20.0	50.0
Инвертор	300.0	300.0	0	25.0	98.0
Свинцово-кислотная АКБ	200.0	200.0	10.0	15.0	70.0

Табл. 3. Конфигурации систем
 Tab. 3. Investigated system configurations

№	ФЭП, кВт	ДГУ, кВт	АКБ, кВт · ч	Инвертор, кВт	NPC, \$	Доля ВИЭ, %	Расход топлива, л/год	Стоимость электроэнергии, \$/кВт · ч	Избыток энергии, %
B1	4.5	3.0	1.0	4.0	94796	14.7	6187	0.321	14.2
B2	5.5	3.0	1.0	6.0	94683	15.4	6139	0.322	19.1
B3	7.5	3.0	1.0	7.5	95700	16.5	6064	0.325	24.3
B4	10.0	3.0	1.0	11.0	96789	17.5	6006	0.328	32.1
B5	15.0	3.0	1.0	15.0	98576	19.9	5835	0.334	43.7

Можно утверждать, что, несмотря на снижение общего времени работы дизельной генераторной установки (ДГУ) и, соответственно, потребления топлива, увеличение мощности солнечного массива без увеличения объема системы накопления электроэнергии не является эффективным решением повышения автономности системы. Большая разница между суммарной избыточной энергией и возобновляемым потенциалом связана со значительными просадками в генерации ВИЭ в осенне-зимний период и избытком генерации в летние месяцы.

На рис. 7–9 представлена выработка конфигурации В1 гибридной системы, состоящей из массива солнечных модулей общей мощностью 4.5 кВт; дизельного генератора мощностью 3 кВт; инвертора 4.5 кВт и АКБ 12 В 100 А · ч. На графике не отображена нагрузка системы АКБ, поскольку при общем ресурсе АКБ в 1.2 кВт · ч и потребительской нагрузке от 2.5 кВт накопленная энергия не задействуется.

Постоянная "подкачка" из АКБ привела бы к увеличению количества циклов заряда/разряда АКБ, что значительно сократило бы срок ее службы, даже при использовании оптимального параметра глубины разряда в 60 %. Общий годовой объем генерации массива солнечных элементов составил 19 469 кВт · ч, общая годовая генерация дизельного генератора составила 6711 кВт · ч, что соответствует 74.4 % и 25.6 % сгенерированного объема соответственно.

Рассматривая высокомоощную конфигурацию В5 с общей мощностью фотовольтаического массива 15 кВт, дизельным генератором на 3 кВт и 1 АКБ 12 В 100 А · ч, стоит отметить, что благодаря особенностям климата увеличенный массив солнечных элементов способен достигать пиковых показателей генерации в 11 кВт даже в зимний период. Пиковая выработка PV-массива в летние месяцы несколько ниже – 10 кВт, однако генерация при помощи фотовольтаических элементов начинается

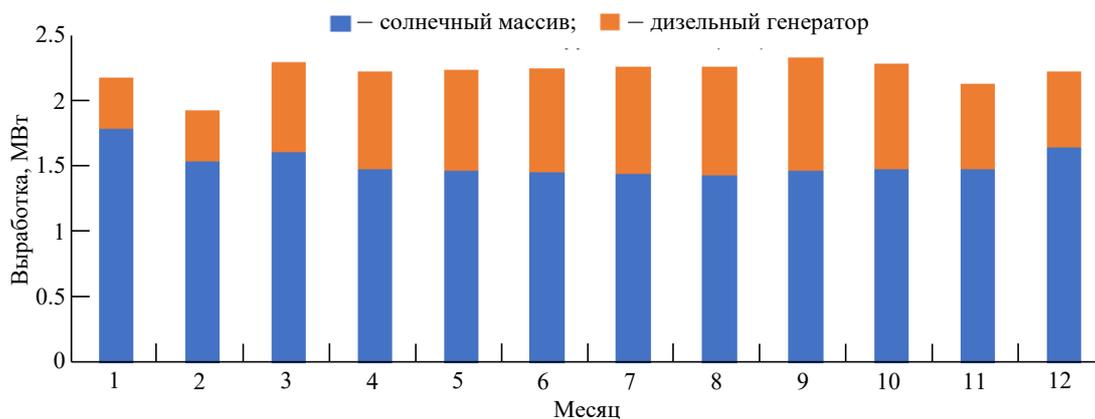


Рис. 7. Месячная выработка электроэнергии конфигурации В1

Fig. 7. Monthly electricity generation of B1 system configuration

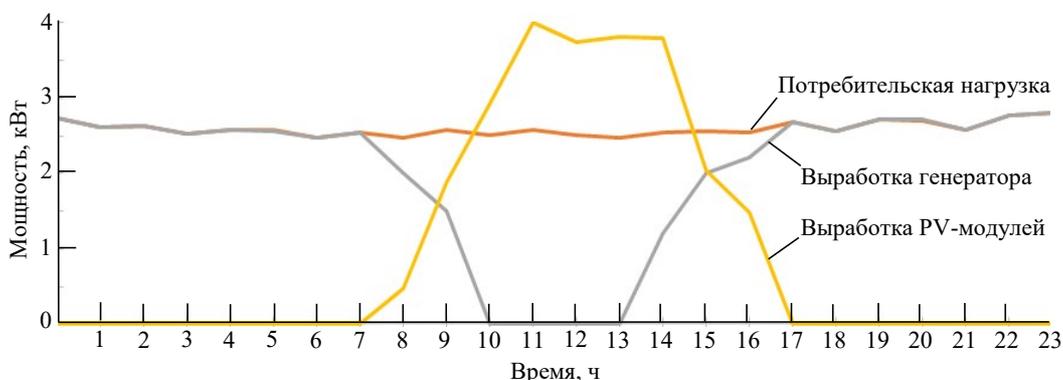


Рис. 8. Суточные выходные параметры конфигурации В1 в условиях 16 декабря

Fig. 8. Daily output parameters of B1 configuration on December 16

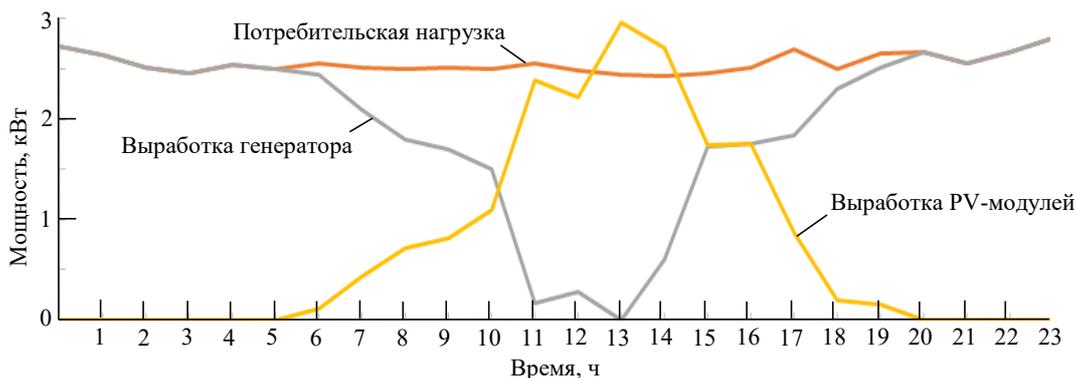


Рис. 9. Суточные выходные параметры конфигурации В1 в условиях 16 июля
 Fig. 9. Daily output parameters of B1 configuration on July 16

раньше (с 5:00) и заканчивается позже (около 20:00) (рис. 11). Увеличенный период работы солнечных элементов в летнее время с 5:00 до 20:00, связанный с продолжительностью светового дня, позволяет повысить суммарную выработку электроэнергии (рис. 9). По сравнению с зимним периодом период работы солнечных элементов дольше в среднем на 4.5 ч (рис. 11, 12).

При анализе рис. 7, 10 заметны периоды

максимальной и минимальной выработки в течение года. В конфигурациях В1 и В5 выработка солнечного модуля была минимальна в апреле, мае и декабре, что соответствовало усредненному показателю среднесуточной выработки в 1.40, 1.42, 1.4 кВт для конфигурации В1 и 4.62, 4.62, 4.60 кВт для конфигурации В5. Данные просадки коррелируют с относительно низкими показателями инсоляции, а также с низкими показателями индекса чистоты неба.

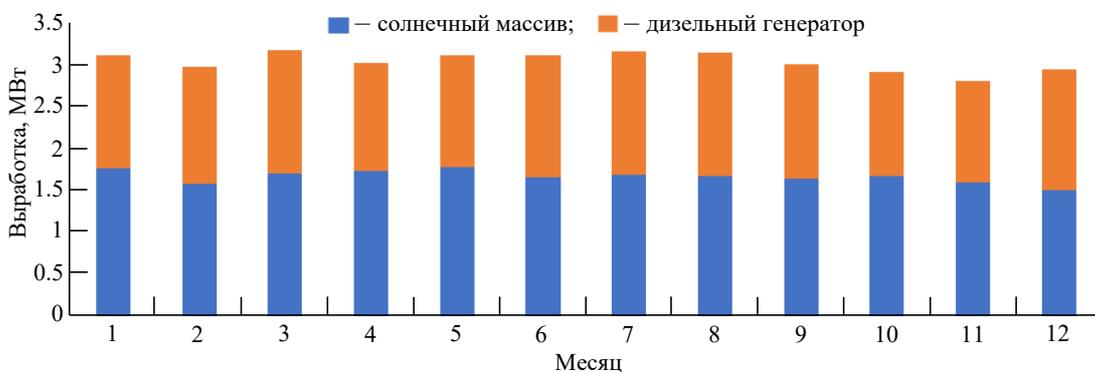


Рис. 10. Месячная выработка электроэнергии конфигурации В5
 Fig. 10. Monthly electricity generation of B5 system configuration

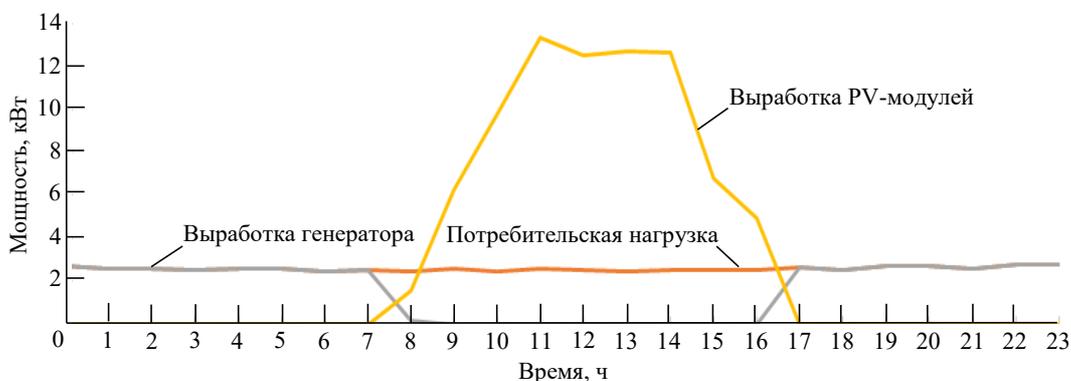


Рис. 11. Суточные выходные параметры конфигурации В5 в условиях 16 декабря
 Fig. 11. Daily output parameters of B5 configuration on December 16

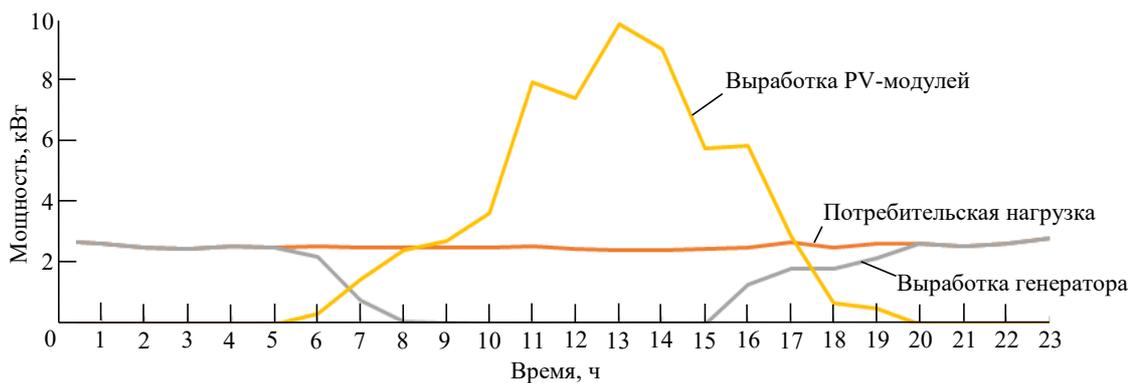


Рис. 12. Суточные выходные параметры конфигурации B5 в условиях 16 июля

Fig. 12. Daily output parameters of B5 configuration on July 16

На рис. 11, 12 представлены суточные выработки высокомощной конфигурации B5, обладающей мощностью массива солнечных элементов 15 кВт. Благодаря высокому солнечному потенциалу и увеличенной общей мощности массива солнечных элементов генерация электроэнергии значительно превышает потребительскую нагрузку, которая составляет в среднем 2.5 кВт · ч. На примере выработки одного дня зимнего периода (16 декабря) можно пронаблюдать, что генерация электроэнергии начинается около 7:00, достигает значения 13 кВт к 11:00, продолжается до 14:00, после чего идет на спад и останавливается к 17:00. Стоит отметить, что начало генерации совпадает со временем наступления навигационных сумерек 16 декабря – 07:14, пик генерации находится в районе времени нахождения солнца в зените – 12:58, а конец генерации заканчивается с началом астрономических сумерек – 18:09 [15].

В летний период, на примере суточной выработки 16 июля, зависимость генерации от

времени суток схожа с конфигурацией B1: генерация электроэнергии при помощи PV-элементов начинается около 5:00, достигает максимума в районе 10 кВт к 12:00, пиковая генерация продолжается до 15:00, после чего постепенно снижется в течение нескольких часов, к 19:00 генерация электроэнергии заканчивается. Генерация начинается в 05:15 – время утренних гражданских сумерек (интервал угла нахождения солнца под горизонтом от 0 до 6°), Солнце находится в зените в 13:09, что также соответствует периоду пиковой генерации, окончание генерации совпадает со временем захода солнца – 20:30 [14].

На основе полученных данных о выработке электроэнергии при помощи PV-элементов среднесуточные показатели выработки составляют от 31 до 40 % для конфигурации мощностью 4.5 кВт (B1) и от 30 до 40 % для конфигурации мощностью 15 кВт (B5), которые представлены на рис. 13–15. Расчет среднесуточных показателей выработки выполнялся исходя из

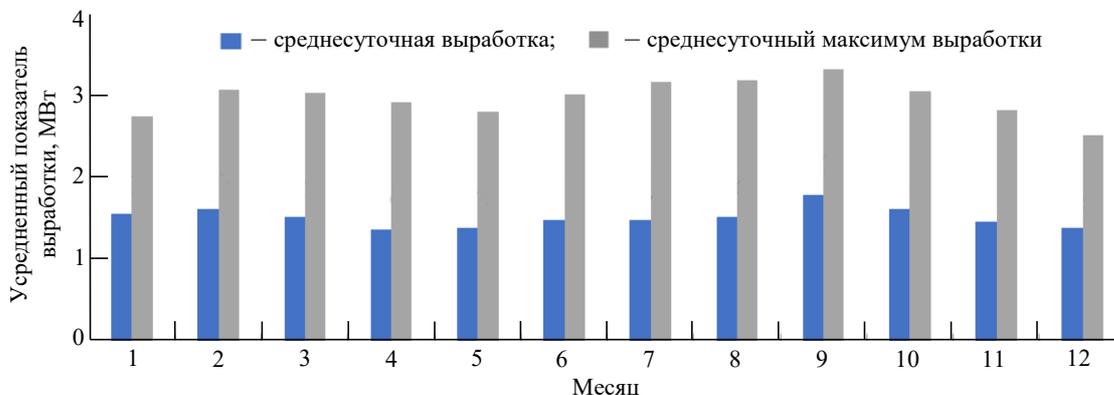


Рис. 13. Среднесуточные выходные параметры системы солнечных фотопреобразователей конфигурации B1

Fig. 13. Average daily output parameters of the photovoltaic system in configuration B1

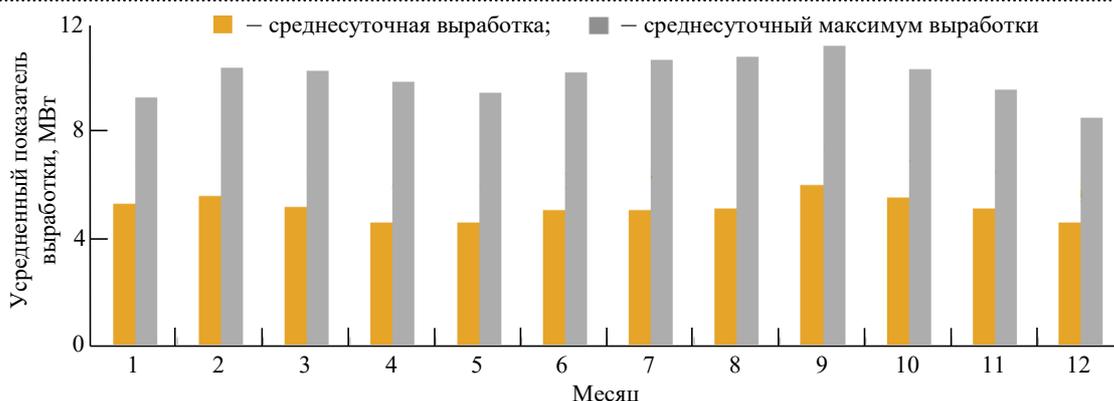


Рис. 14. Среднесуточные выходные параметры системы солнечных фотопреобразователей конфигурации B5
 Fig. 14. Average daily output parameters of the photovoltaic system in configuration B5

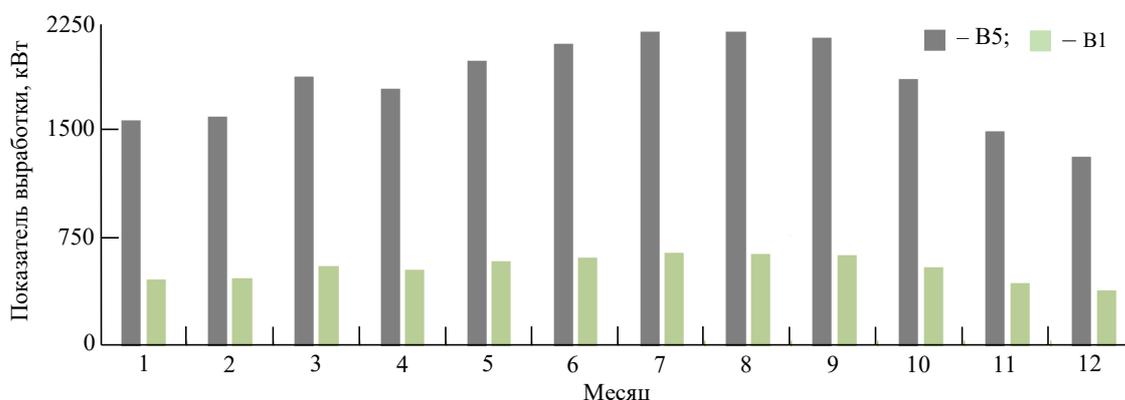


Рис. 15. Суммарная выработка за месяц солнечных массивов конфигураций B1 (4.5 кВт) и B5 (15 кВт)
 Fig. 15. Monthly total output of solar arrays of configuration B1 (4.5 kW) and B5 (15 kW)

продолжительности светового дня (периода генерации электроэнергии PV-модулями). Таким образом, можно сделать вывод, что для обеспечения нагрузки в начале светового дня и его завершении необходим дополнительный источник питания, способный дополнять низкую генерацию в периоды малой солнечной активности.

В табл. 4 представлены результаты моделирования условий без ограничения по финансовым составляющим, что позволяет использовать компоненты больших мощностей. Стоит отметить, что с увеличением массива PV-панелей не

всегда происходит снижение стоимости электроэнергии (B8). Существует определенная точка в зависимости общей мощности массива PV-элементов и стоимости электроэнергии. При дальнейшем расширении системы происходит значительное увеличение стоимости электроэнергии. Это связано с ростом начальных капиталовложений, необходимых для масштабирования массива PV-компонентов. Стоит отметить вышеупомянутую зависимость роста избытков электроэнергии от увеличения общей мощности установленных PV-элементов. Для продления срока жизни компонентов системы накопления

Табл. 4. Конфигурации систем с неограниченным бюджетом

Tab. 4. System configurations with unlimited budget

№	ФЭП, кВт	ДГУ, кВт	АКБ, кВт·ч	Инвертор, кВт	NPС, \$	Доля ВИЭ, %	Расход топлива, л/год	Стоимость электроэнергии, \$/кВт·ч	Избыток энергии, %
B6	12.0	3.0	11.0	12.0	79094	37.8	4359	0.268	29.7
B7	15.0	3.0	12.0	15.0	79383	39.0	4275	0.269	36.0
B8	20.0	3.0	20.0	20.0	8557	46.7	3920	0.277	43.7
B9	26.7	5.0	-	30	134590	69.5	5639	0.362	59.9
B10	53.1	3.0	150	53.5	112796	97.1	212	0.382	67.4

электроэнергии установлено значение максимальной глубины разряда – 60 %. При внедрении искусственного ограничения на глубину разряда системы АКБ и количество циклов заряда/разряда увеличивается общий объем системы накопления энергии и, соответственно, число АКБ. Таким образом, вместе с увеличением суммарной мощности солнечных фотопреобразователей необходимо увеличение системы накопления энергии. Комбинированный эффект увеличенной стоимости составляющих системы уже в большей степени оказывает влияние на стоимость электроэнергии.

Заключение. В ходе исследования был проведен анализ возобновляемого потенциала Республики Армения. На территорию страны поступает большое количество солнечной радиации – $1720 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, а также в республике активными темпами ведется инвестирование и развитие отрасли солнечной энергетики. Составленные критерии оценки пригодных территорий для внедрения СЭС позволили выделить наиболее перспективные регионы для последующего моделирования условий эксплуатации СЭС. Рассмотренные регионы входят в области повышенного фотовольтаического потенциала, оценка которого была проведена Фондом возобновляемых ресурсов и энергоэффективности Армении (R2E2).

На основе проведенного анализа возобновляемого потенциала было принято решение выполнить моделирование условий эксплуатации СЭС для автономного энергоснабжения БССС. С использованием данных о потребительской нагрузке сотовой станции, которая в среднем составляла $2.5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, и программного обеспечения HOMER Pro была сформирована компонентная база для моделирования автономной СЭС, для которой наиболее выгодным с точки зрения технико-экономических параметров является конфигурация гибридной СЭС с использованием массива солнечных элементов мощностью 4.5 кВт и дизельного генератора мощностью 3.0 кВт . Основными параметрами, по которым оценивалась эффективность системы, являлись приведенная стоимость системы, вклад возобновляемых источников в генерацию электроэнергии, расход топлива и стоимость произведенной электроэнергии. Для рассчитан-

ной конфигурации общая приведенная стоимость составила $94\,796 \text{ \$}$, стоимость электроэнергии – $0.321 \text{ \$/кВт} \cdot \text{ч}$, расход топлива – 6187 л/год .

Для определения наиболее оптимальной конфигурации гибридной СЭС в исследовании были смоделированы конфигурации с расширенной системой накопления электроэнергии (табл. 4). Наиболее выигрышной конфигурацией является гибридная СЭС с общей мощностью солнечного массива 12.0 кВт , дизельным генератором мощностью 3.0 кВт и системой накопления электроэнергии $11.0 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. Стоимость электроэнергии данной конфигурации составила $0.268 \text{ \$/кВт} \cdot \text{ч}$, а общая приведенная стоимость системы $79\,094 \text{ \$}$. Благодаря большому вкладу PV ВИЭ в генерацию электроэнергии и накопителям энергии расход топлива удалось сократить до 4359 л/год , что на 1828 л меньше (29.5%) конфигурации без накопителей электроэнергии. Сокращение расходов дизельного топлива позволяет сэкономить $1956 \text{ \$}$ в год.

Таким образом, при постановке задачи об использовании ВИЭ для повышения автономности электроснабжения отдельных объектов возможно рассмотреть два примера. Конфигурация В9, которая не содержит системы накопления электроэнергии, с 26.7 кВт PV-массивом, 5.0 кВт дизельным генератором и инверторной системой на 30.0 кВт . За счет сокращения системы накопления электроэнергии повышается общее время работы генератора: ночное время, периоды низкой выработки фотовольтаических элементов. Стоит отметить, что в такой конфигурации дизельный генератор был задействован в летнее время в большей степени – это обусловлено необходимостью генерации достаточного количества электроэнергии при нехватке выработки солнечными элементами. В такие периоды нагрузка ДГУ составляла от 30 до 50% от общей мощности генератора. Очевидно, что даже при минимальной нагрузке с увеличением продолжительности работы ДГУ растет и расход топлива, а общий эксплуатационный ресурс снижается.

За счет увеличения массива солнечных элементов на примере В10 с показателем доли генерации электроэнергии при помощи ВИЭ

97.1 % возможно добиться практически полного покрытия потребительской нагрузки при помощи солнечной электроэнергии. Однако оставшиеся проценты представляют собой пе-

риоды низкой солнечной активности в течение года, что вынуждает использовать вспомогательный источник электроэнергии в виде ДГУ.

Авторский вклад

Костик Никита Русланович – литературный обзор; исследование климатических особенностей региона; анализ данных; моделирование условий эксплуатации систем; подбор компонентов для моделирования систем; оптимизация результатов; оформление материала статьи и выводов по исследованию.

Тарасов Сергей Анатольевич – постановка задачи; обсуждение результатов; руководство научными исследованиями.

Айвазян Гагик Ерджаникович – сбор и анализ данных о потребительской нагрузке рассматриваемых систем; сбор данных о географическом положении рассматриваемого региона исследований; консультация о метеорологических, географических, социоэкономических особенностях Республики Армении.

Author's contribution

Nikita R. Kostik, literature review; study of the climatic features of the region; data analysis; modeling of operating conditions for systems; selection of components for modeling systems; optimization of results; preparation of the article material and conclusions of the study.

Sergey A. Tarasov, definition of research scope; discussing the results; supervising scientific research.

Gagik Ye. Aivasyan, collection and analysis of data of consumption load of the investigated systems; data collection of the study region; consultation on meteorological, geographical, socio-economic features of the Republic of Armenia.

Список литературы

1. Маркаров А. А., Давтян В. С. Развитие возобновляемой энергетики в Армении: вызовы диверсификации // Геоэкономика энергетики. 2021. № 3 (15). С. 116–129. doi: 10.48137/2687-0703_2020_15_3_116

2. Давтян В. С., Тевосян О. Тенденции развития энергетической политики Армении. Ереван: Фонд Конрада Аденауэра, 2019. С. 97–98.

3. Аршакаян Д. Т. Особенности развития энергетики Республики Армения при суверенизации и рыночной экономике // Теплоэнергетика. 1995. № 2. С. 74–77.

4. Тиробян К. Г. Армения, устремленная в будущее: солнечная энергетика, перспективы и проблемы // Современные тенденции в развитии экономики энергетики: сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 03 дек. 2021. Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2022. С. 179.

5. Программа деятельности Правительства Республики Армения, 2019. Приложение к Решению Правительства РА № 65-А. URL: <https://www.gov.am/files/docs/3133.pdf> (дата обращения 22.01.2023)

6. Feasibility Study 55 MWp Masrik 1 PV Plant Mets Masrik (Armenia). 2017. URL: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Masrik-1-FS-Eng.pdf> (дата обращения 22.01.2023)

7. Feasibility Study 19.4MWp Masrik 2 PV Plant Vardenis, Gegharkunik Marz (Armenia). 2017. URL: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Masrik-2-FS-Eng.pdf> (дата обращения 22.01.2023)

8. Feasibility Study 15.24MWp Gagarin PV Plant Hrazdan-Kotayk (Armenia). 2017. URL: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Gagarin-FS-Eng.pdf> (дата обращения 22.01.2023)

9. Feasibility Study 12.5MWp Talin 2 PV Plant Archadzor-Talin (Armenia). 2017. URL: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Talin-2-FS-Eng.pdf> (дата обращения 22.01.2023)

10. Feasibility Study 5.5MWp Merdzavan PV Plant Merdzavan (Armenia). 2017. URL: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Merdzavan-FS-Eng.pdf> (дата обращения 22.01.2023)

11. Feasibility Study 12.5MWp Dashtadem 1 PV Plant dashtademtalin (Armenia). 2017. URL: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Dashtadem-1-FS-Eng.pdf> (дата обращения 22.01.2023)

12. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands / G. A. Barron-Gafford, M. A. Pavao-Zuckerman, R. L. Minor, L. F. Sutter, I. Barnett-Moreno, D. T. Blackett, M. Thompson, K. Dimond, A. K. Gerlak, G. P. Nabhan, J. E. Macknick // Nature Sustainability. 2019. № 2. P. 848–855. doi: 10.1038/s41893-019-0364-5

13. Parthiban R., Ponnambalam P. An Enhancement of the Solar Panel Efficiency: A Comprehensive Review // Front. Energy Res. 2022. Vol. 10. Art. no. 937155. doi: 10.3389/fenrg.2022.937155

14. Movsisyan A. Investment Plan for Armenia, Scaling UP Renewable Energy Program (SREP). URL: https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/Armenia%20SREP%20Investment%20Plan_final.pdf (дата обращения 22.01.2023)

15. Жаров В. Е. Сферическая астрономия. Фрязино: Век 2, 2006. С. 96.

Информация об авторах

Костик Никита Русланович – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2019), аспирант 4-го года обучения по направлению "Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии", ассистент кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 15 научных публикаций. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; агривольтайка; возобновляемая энергетика; фотовольтаика. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: nrkostik@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5146-8549>

Тарасов Сергей Анатольевич – доктор технических наук (2016), заведующий кафедрой фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 160 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика; физика и оптика полупроводников; светоизлучающие и фоточувствительные приборы. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: satarasov@etu.ru

Айвазян Гагик Ерджаникович – кандидат технических наук (1988), доцент (1995), заведующий лабораторией "Оптоэлектронные приборы" Национального политехнического университета Армении. Автор более 90 научных публикаций. Сфера научных интересов – микроэлектроника; солнечная энергетика; фоточувствительные приборы; кремниевые наноструктуры. Адрес: Национальный политехнический университет Армении, ул. Теряна, д. 105, 0009, Ереван, Армения
E-mail: agagarm@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0001-9245-6758>

References

1. Markarov A. A., Davtjan V. S. Renewable Energy Development in Armenia: Challenges to Diversification. *Geoeconomics of Energy*. 2021, no. 3 (15), pp. 116–129. doi: 10.48137/2687-0703_2020_15_3_116 (In Russ.)
2. Davtjan V. S., Tevosjan O. *Tendencii razvitiya jenergeticheskoj politiki Armenii* [Trends in the Development of the Energy Policy of Armenia]. Yerevan, Konrad Adenauer Foundation, 2019, pp. 97–98. (In Russ.)
3. Arshakjan D. T. *Osobennosti razvitiya jenergetiki Respubliki Armenija pri suverenizacii i rynochnoj jekonomike* [Peculiarities of Energy Development in the Republic of Armenia under Sovereignization and Market Economy]. *Teplojenergetika*. 1995, no. 2. pp. 74–77. (In Russ.)
4. Tirobjan K.G. *Ustremennaja v budushhee: solnechnaja jenergetika, perspektivy i problemy. Sovremennye tendencii v razvitii jekonomiki jenergetiki* [Armenia looking to the future: solar energy, prospects and problems. Modern trends in the development of energy economics]. Proc. of the II Intern. Scientific and Practical Conf. Minsk, December 3, 2021. Minsk, Belarusian National Technical University, 2022, p. 179. (In Russ.)
5. *Programma dejatel'nosti Pravitel'stva Respubliki Armenija* [Program of Activities of the Government of the Republic of Armenia]. Annex to the Decision of the Government of the Republic of Armenia No. 65-A. Available at: <https://www.gov.am/files/docs/3133.pdf> (accessed 22.01.2023)
6. Feasibility Study 55MWp Masrik 1 PV Plant Mets Masrik (Armenia). 2017. Available at: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Masrik-1-FS-Eng.pdf> (accessed 22.01.2023)
7. Feasibility Study 19.4MWp Masrik 2 PV Plant Vardenis, Gegharkunik Marz (Armenia). 2017. Available at: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Masrik-2-FS-Eng.pdf> (accessed 22.01.2023)
8. Feasibility Study 15.24MWp Gagarin PV Plant Hrazdan-Kotayk (Armenia). 2017. Available at: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Gagarin-FS-Eng.pdf> (accessed 22.01.2023)
9. Feasibility Study 12.5MWp Talin 2 PV Plant Archadzor-Talin (Armenia). 2017. Available at: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Talin-2-FS-Eng.pdf> (accessed 22.01.2023)
10. Feasibility Study 5.5MWp Merdzavan PV Plant Merdzavan (Armenia). 2017. Available at: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Merdzavan-FS-Eng.pdf> (accessed 22.01.2023)
11. Feasibility Study 12.5MWp Dashtadem 1 PV Plant Dashtadementalin (Armenia). 2017. Available at: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Dashtadem-1-FS-Eng.pdf> (accessed 22.01.2023)
12. Barron-Gafford G. A., Pavao-Zuckerman M. A., Minor R. L., Sutter L. F., Barnett-Moreno I., Blackett D. T., Thompson M., Dimond K., Gerlak A. K., Nabhan G. P., Macknick J. E. Agrivoltaics Provide Mutual Benefits Across the Food–Energy–Water Nexus in Drylands. *Nature Sustainability*. 2019, no. 2, pp. 848–855. doi: 10.1038/s41893-019-0364-5

13. Parthiban R., Ponnambalam P. An Enhancement of the Solar Panel Efficiency: A Comprehensive Review. *Front. Energy Res.* 2022, vol. 10, art. no. 937155. doi: 10.3389/fenrg.2022.937155

14. Movsissyan A. Investment Plan for Armenia, Scaling UP Renewable Energy Program (SREP). Available at: <https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/Armeni>

[a%20SREP%20Investment%20Plan_final.pdf](#) (accessed 22.01.2023)

15. Zharov V. E. *Voshod i zahod nebesnyh tel. Sfericheskaja astronomija* [Spherical Astronomy. Rise and Set of Celestial Bodies]. Fryazino, Century 2, 2006, p. 96. (In Russ.)

Information about the authors

Nikita R. Kostik, Master Degree in Electronics and Nanoelectronics (2019), 4-year Postgraduate Student in Photonics, instrumentation, optical and biotechnical systems and technologies (2023), Assistant of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 15 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics, agrivoltaics; renewable energy; photovoltaics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: nrkostik@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5146-8549>

Sergey A. Tarasov, Dr Sci. (Eng.) (2016), Head of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 160 scientific papers. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy; physics and optics of semiconductors; light-emitting and photosensitive devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: satarasov@etu.ru

Gagik Ye. Ayvasyan, Cand. Sci. (Eng.) (1988), Associate Professor (1995), Head of "Optoelectronic Devices laboratory" of the National Polytechnic University of Armenia. The author of more than 90 scientific publications. Area of expertise: microelectronics; solar energy; photosensitive devices; silicon nanostructures.

Address: National Polytechnic University of Armenia, 105, Teryan St., Yerevan 0009, Armenia

E-mail: agagarm@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0001-9245-6758>

Минималистичная система характеристик нелинейных видеоимпульсных устройств и ее измерение

М. А. Назаров^{1,2}✉, Э. В. Семенов^{1,2}

¹ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук, Томск, Россия

² Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, Томск, Россия

✉ mnaz90@mail.ru

Аннотация

Введение. Распространенная система параметров, включающая точки компрессии и точки пересечения для различных гармоник, непригодна для устройств, работающих при видеоимпульсных воздействиях (например, до модулятора в передатчике, после демодулятора в приемнике). Ранее авторами разработаны простые модели в виде нелинейных рекурсивных фильтров, дающие удовлетворительную погрешность описания отклика широкого класса видеоимпульсных цепей. Система нелинейных функций таких моделей может рассматриваться как новая система характеристик нелинейно-инерционных видеоимпульсных цепей, для чего необходимо разработать метод, обеспечивающий их измерение с допустимой погрешностью. В общей постановке эта задача весьма сложна, поэтому в настоящей статье рассмотрен лишь нелинейный рекурсивный фильтр первого порядка. Полученные зависимости, тем не менее, дают удовлетворительные результаты для устройств без выброса на плоской вершине переходной характеристики.

Цель работы. Рассмотреть способ измерения характеристик нелинейно-инерционных видеоимпульсных устройств без выброса на плоской вершине переходной характеристики.

Материалы и методы. Рассмотренный рекурсивный фильтр представлен эквивалентной схемой из нелинейных резистивного и емкостного элементов. Поэтому задача сводится к измерению их вольт-амперной характеристики (ВАХ) и кулон-вольтовой характеристики. ВАХ измеряется на плоских вершинах переходных характеристик устройства. Имея определенную ВАХ, получаем возможность вычислить ток (и далее заряд) емкостного элемента. Экспериментальное исследование выполнено на примере трехкаскадного усилителя с апериодической переходной характеристикой.

Результаты. Переходные характеристики фильтра аппроксимированы моделью с точностью не хуже 3.2 %.

Заключение. Рассмотренная система функций может быть получена с определяемой и удовлетворительной для практики погрешностью, что позволяет ее рассматривать как новую систему параметров нелинейных видеоимпульсных устройств.

Ключевые слова: нелинейные поведенческие модели, видеоимпульсные сигналы, вольт-амперная характеристика, кулон-вольтовая характеристика, нелинейные искажения

Для цитирования: Назаров М. А., Семенов Э. В. Минималистичная система характеристик нелинейных видеоимпульсных устройств и ее измерение // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 123–132. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-123-132

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-00605.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; принята к публикации после рецензирования 14.08.2023; опубликована онлайн 28.09.2023



Minimalistic System of Characteristics of Non-linear Baseband Pulse Devices and Its Measurement

Maxim A. Nazarov^{1,2}✉, Edward V. Semyonov^{1,2}

¹Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

✉ mnaz90@mail.ru

Abstract

Introduction. The general system of parameters, including compression points and intersection points of various harmonics, is unsuitable for devices operating under the influence of baseband pulses (for example, before the modulator in the transmitter, after the demodulator in the receiver). Previously, the authors have developed simple models in the form of nonlinear recursive filters, which give a satisfactory error in describing the response of a wide class of baseband pulse circuits. The system of nonlinear functions of such models can be considered as a new system of characteristics of nonlinear-dynamical baseband impulse circuits, for which it is necessary to develop a method that ensures their measurement with an acceptable error. In the general formulation, this problem is rather challenging; therefore, this article considers only a first-order nonlinear recursive filter. However, the obtained result gives satisfactory results for devices without flat top transient overshoot.

Aim. To consider a method for measuring the characteristics of nonlinear-dynamical baseband impulse devices without overshoot on the flat top of the transient response.

Materials and methods. The considered recursive filter is represented by an equivalent circuit consist of nonlinear resistive and capacitive elements. Therefore, the task is reduced to measuring their current-voltage characteristics (IV) and charge-voltage characteristics (CVC). IV characteristics are measured at the flat tops of the transient characteristics of the device. Having a certain IV, we obtain the opportunity to calculate the current (and then the charge) of the capacitive element. The experimental study was carried out on the example of a three-stage amplifier with an aperiodic transient response.

Results. The transient characteristics of the filter are approximated by the model with an accuracy of no worse than 3.2 %.

Conclusion. The considered system of functions can be obtained with a definable error that satisfactory for practice, which allows it to be considered as a new system of parameters for nonlinear baseband pulse devices.

Keywords: nonlinear behavioral models, baseband pulse signals, current-voltage characteristic, charge-voltage characteristic, nonlinear distortions

For citation: Nazarov M. A., Semyonov E. V. Minimalistic System of Characteristics of Non-linear Baseband Pulse Devices and Its Measurement. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 123–132. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-123-132

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-29-00605.

Submitted 12.05.2023; accepted 14.08.2023; published online 28.09.2023

Введение. Видеоимпульсные сигналы получили широкое распространение в системах связи, цифровых каналах передачи информации, а также в системах измерений. Определение характеристик устройств, обеспечивающих передачу и обработку видеоимпульсных сигналов, является важной задачей при их проектировании.

Указанные системы, в общем случае, содер-

жат нелинейные каскады. Это требует рассмотрения всей системы как нелинейной. Известны 2 подхода к описанию нелинейных устройств [1–3]: использование моделей в виде принципиальных схем и поведенческих моделей устройств. Модели на основе принципиальных схем требуют знания характеристик отдельно взятых электронных компонентов, из которых

состоит устройство. Точность моделирования ограничена качеством моделей активных компонентов, из которых состоит устройство.

Поведенческие модели устанавливают связь между выходом и входом устройства, не требуя знания внутренней структуры устройства. Примером описания устройства на основе поведенческой модели служит модель полигармонических искажений [4–7]. Указанные модели позволяют описывать поведение устройств, работающих при воздействии узкополосными сигналами, но не подходят для описания реакции на импульсные сигналы, имеющие сплошной спектр.

При видеоимпульсных воздействиях адекватны модели, основанные на ряде Вольтерры–Винера. При практической реализации они приводят к полиномам относительно текущего и предыдущих значений входного сигнала [8]. Из-за отсутствия рекурсивных связей в таких моделях требуется большое количество характеристических функций, что весьма затрудняет их практическое применение. В частности, усложняется решение обратной задачи – нахождение параметров модели по ограниченному числу измерений ее характеристик [9]. При большом порядке модели задача становится плохо обусловленной, а решение – неоднозначным, что делает невозможным вычисление погрешности определения характеристических функций полученного решения. Указанное обстоятельство не позволяет рассматривать систему функций в моделях Вольтерры–Винера как собственную систему характеристик нелинейно-инерционных видеоимпульсных цепей аналогично моделям полигармонических искажений (X -параметрам).

Ранее авторами настоящей статьи разработаны модели в виде многопетлевых рекурсивных фильтров с интеграторами в цепях обратной связи. Указанные модели полностью описываются 2–5 нелинейными функциями [10, 11]. Задача описания процессов в таких моделях существенно упрощается по сравнению с трансверсальными фильтрами (без обратных связей). Однако для моделей второго и третьего порядка часть функций по-прежнему характеризует внутреннюю динамику фильтра, недоступную непосредственному наблюдению. В результате харак-

теристики определяются рекурсивным или итерационным методом [10, 11], что весьма затрудняет нахождение погрешности их определения.

В настоящей статье рассмотрено ограниченно моделью нелинейного рекурсивного фильтра первого порядка, который, тем не менее, удовлетворительно представляет отклики нелинейно-инерционных устройств (усилителей, аналого-цифровых преобразователей и т. д.) без выброса на плоской вершине переходной характеристики. В виде эквивалентной схемы указанный фильтр представляется цепью из нелинейных резистивного и емкостного элементов. Таким образом, задача сводится к измерению вольт-амперной характеристики (ВАХ) и кулон-вольтовой характеристики (КВХ) этих элементов. Напряжения, приложенные к указанным элементам, доступны наблюдению, поэтому задачу нахождения характеристик этих элементов предложено рассматривать как косвенные измерения с определяемой погрешностью.

Цель настоящей статьи – рассмотреть метод измерения характеристических функций нелинейного рекурсивного фильтра первого порядка, позволяющий определять погрешность измерения.

Используемая нелинейно-инерционная модель устройств. Нелинейные резистивный и емкостный элементы, представляющие используемую модель в виде эквивалентной схемы, могут быть соединены по-разному. Наиболее простой для анализа и интерпретации представляется цепь, состоящая из емкостного и электропроводного элементов [6]. Для такой цепи входным параметром является протекающий через нее ток, а откликом – падение напряжения на ней. Если в анализируемом устройстве входным сигналом является напряжение падающей волны, оно пересчитывается во входной ток согласно выражению

$$i_{\text{in}}(t) = u_{\text{in}}(t)/\rho,$$

где $i_{\text{in}}(t)$, $u_{\text{in}}(t)$ – сила тока и напряжение падающей волны соответственно; ρ – волновое сопротивление подводящей линии.

Функциональная схема используемой нелинейно-инерционной модели рекурсивного фильтра первого порядка приведена на рис. 1, а

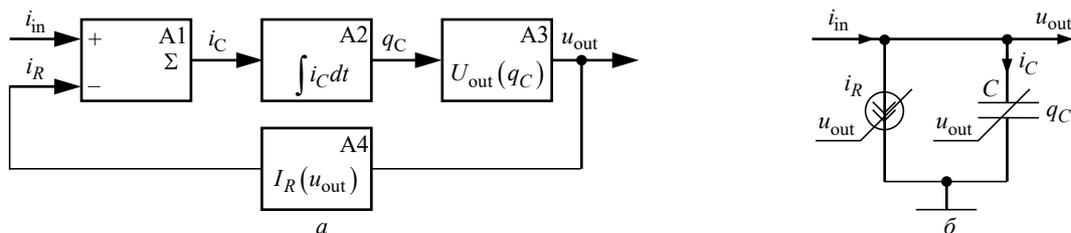


Рис. 1. Функциональная схема нелинейного рекурсивного фильтра первого порядка (а) и его эквивалентная схема (б)
 Fig. 1. Functional diagram of a nonlinear first order recursive filter (a) and its equivalent circuit (b)

[10]. Характеристическими функциями модели являются ВАХ $I_R(u_{out})$ и КВХ $U_{out}(q_C)$.

Эквивалентная схема модели указанного рекурсивного фильтра представлена на рис. 1, б. Во входном узле эквивалентной схемы из входного тока i_{in} ответвляется ток проводимости i_R . Оставшийся ток представляет собой емкостный ток i_C . Указанное преобразование токов отображается на функциональной схеме (рис. 1, а) блоком А1. Интегрированию, представленному на функциональной схеме блоком А2, соответствует заряд конденсатора C эквивалентной схемы, в результате которого возникает заряд q_C . Преобразование заряда в выходное напряжение (узел А3 функциональной схемы) соответствует конденсатору C (рис. 1, б), напряжение на котором нелинейно зависит от заряда. Поданное по цепи обратной связи выходное напряжение поступает на узел А4, который соответствует нелинейному источнику тока i_R на эквивалентной схеме и позволяет рассчитать силу тока проводимости.

Математически модель реализуется совокупностью рекурсивных формул:

$$\begin{aligned} i_C(j) &= i_{in}(j) - i_R(j-1); \\ q_C(j) &= q_C(j-1) + \Delta t [i_C(j) + i_C(j-1)]/2; \\ u_{out}(j) &= U_{out}[q_C(j)]; \\ i_R(j) &= I_R[u_{out}(j)], \end{aligned} \quad (1)$$

где j – номер точки в дискретизированном сигнале; Δt – интервал дискретизации; i_C – ток через конденсатор; i_R – ток через резистор; q_C – заряд конденсатора; u_{out} – выходное напряжение.

Измерение характеристик устройства в рамках нелинейной рекурсивной модели первого порядка. Нелинейные ВАХ и КВХ определяются по результатам экспериментальных измерений. Известно [10, 11, 15], что для получения характеристики нелинейно-инерционных устройств необходимо рассмотреть реакцию на ступенчатые функции разной амплитуды.

Ступенчатый ток i_{in} различной силы (рис. 2, а) задается на входе цепи измерительным генератором. Осцилляции на плоской вершине этих функций являются отклонением от идеальной ступенчатой функции, однако на

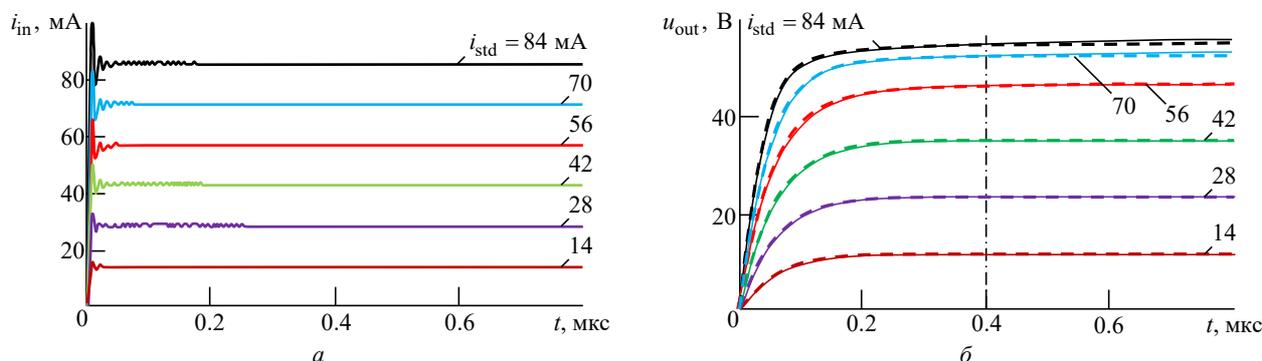


Рис. 2. Семейства входных токов (а) и выходных напряжений (б) для установившихся значений входного тока i_{std} : измеренные (сплошные кривые) и рассчитанные по модели (штриховые кривые). Штрихпунктирная линия – момент стробирования напряжения

Fig. 2. Families of input currents (a) and output voltages (b) for steady input currents i_{std} : measured (solid curve) and calculated by the model (dashed curve). The dash-dotted line is the moment of voltage strobing

результаты измерений существенно не влияют, так как период этих осцилляций (13 нс) много меньше длительности регистрируемой переходной характеристики (200 нс). Отклик цепи первого порядка (рис. 1) на ступенчатый ток имеет экспоненциальный вид с выходом на плоскую вершину (рис. 2, б). Строблируя выходное напряжение на плоских вершинах семейства переходных характеристик, определяем ВАХ резистора $I_R(u_{out})$ для всего семейства входных токов и выходных напряжений. Описанный подход соответствует известному методу импульсного измерения ВАХ [12].

Далее измеряется КВХ объекта. Поскольку воздействие является видеоимпульсным, нужно применять квазистатические методы определения реакции емкостного элемента [13]. Однако непосредственно эти методы в данном случае неприменимы, поскольку параллельно току через емкостный элемент протекает ток электропроводности (через резистор).

Из рис. 1, б и (1) следует, что входной ток i_{in} является суммой тока проводимости и емкостного тока. Семейство токов проводимости $i_R(t)$ определим из зарегистрированного выходного напряжения $u_{out}(t)$ с использованием измеренной ВАХ: $i_R(t) = I_R[u_{out}(t)]$. Емкостный ток $i_C(t)$ определим как разность входного тока и тока проводимости (рис. 3, а):

$$i_C(t) = i_{in}(t) - i_R(t). \quad (2)$$

Интегрированием емкостного тока по времени определяем заряд конденсатора $q_C(t)$

(рис. 3, б). Если модель, представленная на рис. 1, адекватна действительным свойствам объекта измерения, заряд конденсатора должен монотонно увеличиваться с выходом на плоскую вершину. Строблируя заряд и напряжение на плоских вершинах переходных характеристик, определим КВХ $U_{out}(q_C)$. Наблюдаемый на рис. 3, б спад после достижения максимума обусловлен зарядом диффузионных емкостей элементов устройства, не укладываемых в модель первого порядка.

Критерии выбора точки стробирования при измерении характеристик. Входящий в состав модели, представленной на рис. 1, конденсатор безынерционен в том смысле, что установление на нем некоторого напряжения означает формирование заряда конденсатора, определяемого КВХ $U_{out}(q_C)$, без задержки. В реальных объектах измерения накопление энергии, моделируемое емкостным элементом, может сопровождаться задержкой, например при накоплении и релаксации диффузионного заряда при ограниченной скорости диффузии носителей заряда. В результате на вершинах переходных характеристик объекта наблюдается медленное увеличение напряжения, которое не может быть учтено в рамках модели на рис. 1. При этом данный эффект носит нелинейный характер и в большей степени наблюдается при больших сигналах.

Чтобы сохранить удовлетворительное качество моделирования, следует выбирать отсчеты на переходных характеристиках (стробировать) там, где влияние дополнительной инерционности объекта минимально, т. е. сразу после достижения установившегося значения. Однако

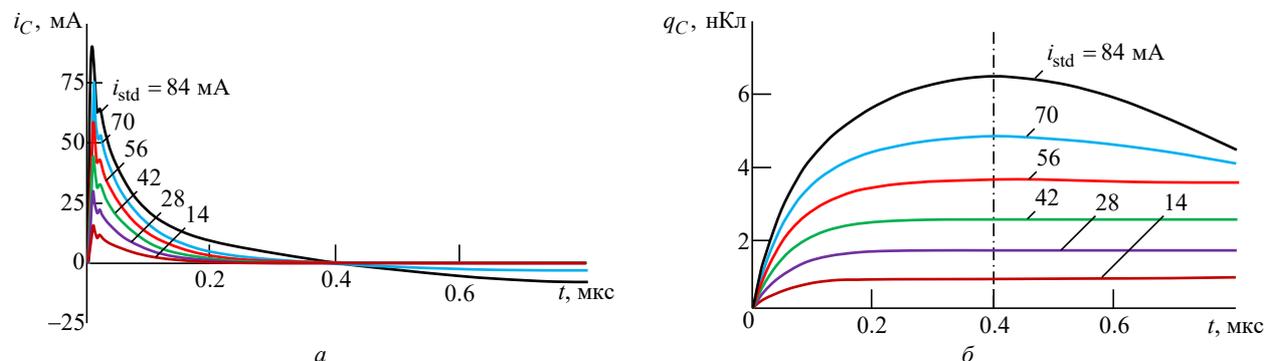


Рис. 3. Семейства емкостных токов (а) и заряда конденсатора (б). Штрихпунктирная линия – момент времени стробирования заряда

Fig. 3. Families of capacitive currents (a) and capacitive charge (б). The dash-dotted line is the moment of voltage strobing

при этом уменьшается диапазон охватываемых значений напряжения и заряда, т. е. сужается диапазон измерения ВАХ и КВХ объекта.

Экспериментальные измерения. В качестве объекта измерения выбран трехкаскадный усилитель (рис. 4).

Входные ступенчатые сигналы формировались генератором сигналов произвольной формы National Instruments PXI-5422. Время нарастания выходного напряжения указанного генератора не превышает 4.8 нс. Переходные характеристики регистрировались аналого-цифровым преобразователем National Instruments PXI-5114 с длительностью переходной характеристики не более 3.5 нс. Указанные параметры не вносят существенных погрешностей в измерение переходных характеристик, поскольку ожидаемое время нарастания выходного напряжения выбранного усилителя составляет несколько сотен наносекунд.

На вход усилителя подавалось семейство токов (см. рис. 2, а) и измерялось семейство откликов по напряжению (см. рис. 2, б, сплошные кривые). Напряжение на выходе усилителя зависит как от входного воздействия, так и от коэффициента усиления и не превышает 60 В. Далее вычислено семейство емкостных токов (см. рис. 3, а) и соответствующее им семейство зарядов (см. рис. 3, б). В соответствии с изложенным методом определены ВАХ (рис. 5, а) и КВХ (рис. 5, б) в точке стробирования, установленной со смещением 0.4 мкс от начала переходного процесса. К этому моменту быстрая часть переходного процесса (для которой модель по рис. 1 адекватна) заканчивается и остается медленное увеличение выходного напряжения, обусловленное зарядом диффузионных емкостей транзисторов.

Проверим рассмотренную модель и метод измерения ее характеристик. Установим в модели (см. рис. 1, а) измеренные ВАХ и КВХ и подадим на ее вход семейство ступенчатых

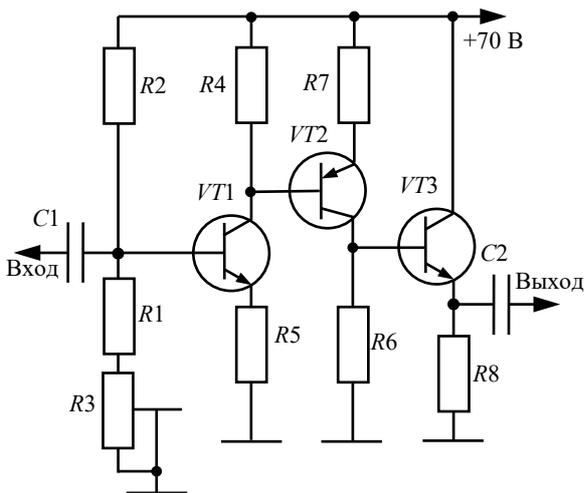


Рис. 4. Принципиальная схема импульсного усилителя мощности

Обозн.	Номинал	Обозн.	Тип
R1	560 Ом	VT1	BD 139-16
R2	51 кОм	VT2	BD 140-16
R3	1 кОм	VT3	BD 139-16
R4	240 Ом		
R5	240 Ом		
R6	1.1 кОм		
R7	120 Ом		
R8	750 Ом		
C1	0.1 мкФ		
C2	47 мкФ		

Fig. 4. Schematic diagram of a switching power amplifier

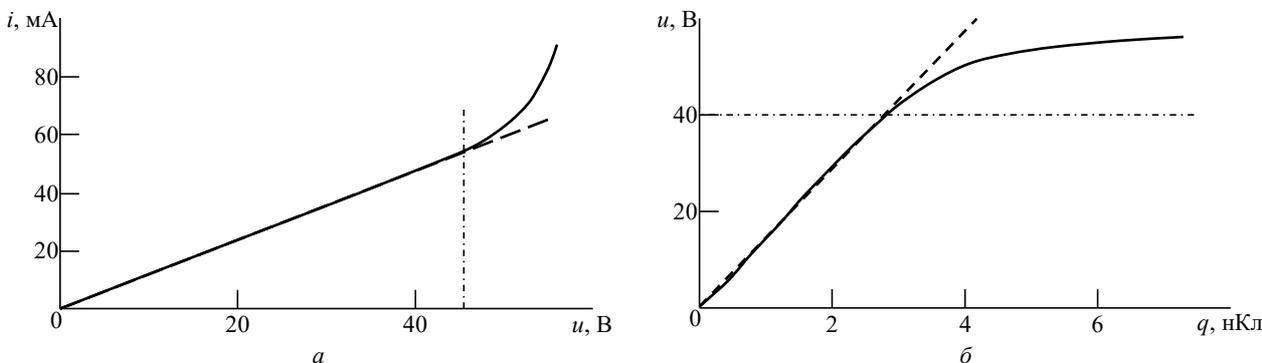


Рис. 5. Вольт-амперная (а) и кулон-вольтовая (б) характеристики. Штриховые линии – линейризация функций. Штрихпунктирные линии – напряжение, начиная с которого характеристики становятся нелинейными

Fig. 5. Current-voltage (а) and charge-voltage (б) characteristics. Dashed lines – the functions linearization. Dashed-dotted lines – the voltage at which the characteristics become nonlinear

функций токов, представленное на рис. 2, а. Отклики модели на это семейство изображены на рис. 2, б штриховыми кривыми. Относительная погрешность между измеренными переходными характеристиками и характеристиками, рассчитанными по модели, составила не более 3.2 %. Для поведенческих моделей это типичный и удовлетворительный результат [10, 11].

Из рис. 5, а и б видно, что с ростом напряжения рассматриваемые характеристики отклоняются от прямой, поскольку усилитель входит в режим насыщения и нелинейные искажения проявляются в большей степени.

Из сравнения рис. 5, а и б следует, что отклонения КВХ от прямой начинаются раньше (при 40 В), чем отклонения ВАХ (при 45 В). Это свидетельствует о том, что нелинейные искажения сигнала на фронте импульса начинаются раньше, чем на плоской вершине. Другими словами, динамическая нелинейность в усилителе превалирует над статической (кроме области выраженного насыщения усилителя).

Оценка погрешности измерения характеристик устройства. Измерения ВАХ и КВХ являются косвенными. Погрешность их измерения определяется погрешностью измерения переходных характеристик.

Инструментальная погрешность измерения переходных характеристик определяется погрешностями генератора ступенчатых функций и регистрирующего устройства.

Генератор ступенчатых функций National Instruments PXI-5422 обладает как статической (на плоской вершине импульса), так и динамической (в пределах переходного процесса) погрешностями воспроизведения сигнала. Поскольку длительность фронта ступенчатой функции (4.8 нс) пренебрежимо мала по сравнению с длительностью переходной характеристики рассматриваемого усилителя (около 150 нс), динамической погрешностью генератора можно пренебречь. Статическая погрешность генератора определяется его амплитудной характеристикой (АХ) и выражается в трех аспектах: смещение АХ по амплитуде, погрешность наклона АХ и ее нелинейность. Смещение по амплитуде и погрешность наклона устраняются при калибровке и далее не учитываются. Нелинейность АХ генератора не превышает

0.3 %. Поскольку генератор задает входной ток устройства, нелинейность его АХ определяет погрешность измерения ВАХ по току.

Динамическую погрешность (в пределах переходного процесса) регистрирующего устройства (National Instruments PXI-5114) также можно не учитывать, поскольку длительность фронта его переходной характеристики не превышает 2.8 нс. Статическая погрешность регистрирующего устройства содержит те же 3 составляющие, что и для генератора. Аналогично рассмотренному для генератора, после калибровки остается только погрешность, связанная с нелинейностью АХ. Нелинейность регистрирующего устройства National Instruments PXI-5114 была оценена в [14] и составляет 0.3 %. Поскольку регистрирующее устройство фиксирует напряжение на выходе объекта измерения, указанную погрешность можно рассматривать как погрешность измерения ВАХ по напряжению.

Погрешность измерения КВХ по напряжению получается аналогично погрешности измерения ВАХ. Погрешность измерения заряда определяется исходя из того, что заряд является интегральной функцией тока $i_C(t)$ через конденсатор модели. Этот ток определяется по (2), поэтому погрешность его измерения зависит от погрешностей установки входного тока $i_{in}(t)$ и погрешности измерения тока проводимости $i_R(t)$. Погрешность установки $i_{in}(t)$, задаваемого генератором, как указывалось, составляет 0.3 %. Предел погрешности для $i_R(t)$ определяется погрешностью измерения u_{out} (0.3 %) и максимальной крутизной ВАХ. На максимально крутом участке ВАХ изменение напряжения на 0.3 % дает изменение тока на 1.6 %. Поскольку максимальные значения токов i_{in} и i_R примерно равны, для отыскания погрешности измерения i_C можно просуммировать относительные погрешности для i_{in} и i_R . В итоге предел погрешности измерения i_C составляет 1.9 %. Погрешность измерения заряда, получаемого интегрированием $i_C(t)$, будет в среднем меньше 1.9 %, поскольку максимальная погрешность наблюдается только в

отдельные моменты времени. Однако эту оценку (1.9 %) можно принять в качестве верхнего предела погрешности измерения q_C .

Заключение. Предложен минималистичный вариант характеристик нелинейных видеоимпульсных устройств. Это характеристики, входящие в качестве нелинейных функций в описание рекурсивного фильтра первого порядка, моделирующего устройство.

Для упрощения интерпретации работы фильтра ему сопоставлена эквивалентная схема из параллельно соединенных емкостного и резистивного элементов с нелинейными свойствами. Входным параметром выбранной модели является ток через RC -цепь, а выходным – напряжение на ней. В итоге характеристическими функциями модели являются ВАХ и КВХ. При необходимости анализа устройств, для которых входным параметром является напряжение, последнее пересчитывается во входной ток с учетом волнового сопротивления подводящей линии.

Показано, что характеристические функции использованной модели могут быть определены со степенью метрологической определенности, позволяющей отнести данную операцию к измерениям с оцениваемой погрешностью. Метод измерения включает регистрацию семейства переходных характеристик объекта измерения при разных амплитудах входного воздействия. ВАХ определяется на плоском участке

этого семейства. КВХ определяется на плоской вершине заряда конденсатора, который находится интегрированием тока через него.

Показано, что точку стробирования для измерения нелинейных характеристик модели следует выбирать на участке, где влияние дополнительной инерционности объекта измерения минимально, т. е. сразу после окончания участка быстрого изменения переходных характеристик.

Метод измерения характеристик объекта проиллюстрирован на примере трехкаскадного импульсного усилителя мощности. Несмотря на то, что усилитель содержит 6 нелинейных емкостей и 6 нелинейных проводимостей, его системные характеристики удовлетворительно описаны предложенной моделью. Относительная погрешность аппроксимации переходных характеристик рассмотренного усилителя по модели не превышает 3.2 %.

Для конкретных числовых параметров входного воздействия определены погрешности измерения характеристик усилителя. Рассмотренная методика позволяет выполнить аналогичный расчет для произвольных уровней входного воздействия при заданной инструментальной погрешности измерения. Погрешность измерения тока и напряжения по характеристикам усилителя не превышает 0.3 %, а погрешность измерения заряда 1.9 %.

Список литературы

1. Nonlinear system and subsystem modeling in the domain / M. I. Sobhy, E. A. Hosny, M. W. R. Ng, E. A. Bakkar // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1996. Vol. 44, iss. 12. P. 2571–2579. doi: 10.1109/22.554605
2. Pedro J. C., Maas S. A. A comparative overview of microwave and wireless power-amplifier behavioral modeling approaches // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2005. Vol. 53, iss. 4. P. 1150–1163. doi: 10.1109/TMTT.2005.845723
3. Systematic behavioral modeling of nonlinear microwave/RF circuits in the time domain using techniques from nonlinear dynamical systems / D. E. Root, J. Wood, N. Tuffillaro, D. Schreurs, A. Pekker // Proc. of the IEEE Intern. Workshop on Behavioral Modeling and Simulation. Santa Rosa, 08 Oct. 2002. P. 71–74. doi: 10.1109/BMAS.2002.1291060
4. Broadband poly-harmonic distortion (PHD) behavioral models from fast automated simulations and

- large-signal vectorial network measurements / D. E. Root, J. Verspecht, D. Sharrit, J. Wood, A. Cognata // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2005. Vol. 53, iss. 11. P. 3656–3664. doi: 10.1109/TMTT.2005.855728
5. Qi H., Benedikt J., Tasker P. A novel approach for effective import of nonlinear device characteristics into CAD for large signal power amplifier design // IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest, San Francisco, 11–16 June 2006. P. 477–480. doi: 10.1109/MWSYM.2006.249596
6. A novel measurement based method enabling rapid extraction of a rf waveform look-up table based behavioral model / S. Woodington, T. Williams, H. Qi, D. Williams, L. Pattison, A. Patterson, J. Lees, J. Benedikt, P. J. Tasker // IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest. Atlanta, 15–20 June 2008. P. 1453–1456. doi: 10.1109/MWSYM.2008.4633053

7. Amini A.-R., Boumaiza S. Time-invariant behavioral modeling for harmonic balance simulation based on waveform shape maps // IEEE MTT-S Intern. Conf. on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), Ottawa, 11–14 Aug. 2015. Acc. № 15805288. doi: 10.1109/NEMO.2015.7415098

8. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers / D. R. Morgan, Z. Ma., J. Kim, M. G. Zierdt, J. Pastalan // IEEE Trans. on Signal Processing. 2006. Vol. 54, iss. 10. P. 3852–3860. doi: 10.1109/TSP.2006.879264

9. Tarantola A. Inverse problem theory and methods for model parameter estimation / Soc. ind. appl. math. 2005. 354 p. doi: 10.1137/1.9780898717921

10. Semyonov E. V. Simple behavioral model of baseband pulse devices in the form of a second-order nonlinear recursive filter // IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2021. Vol. 68, iss. 6. P. 2192–2196. doi: 10.1109/TCSII.2020.3048819

11. Semyonov E. V. Synthesis of behavioral models for circuits with nonlinearity less than model error // IEEE Trans. on Circuits and Systems II:

Express Briefs. 2023. Vol. 70, iss. 6. P. 2216–2220. doi: 10.1109/TCSII.2022.3231873

12. Ultra-short pulse current–voltage characterization of the intrinsic characteristics of high- κ devices / C. D. Young, Y. Zhao, M. Pendley, B. H. Lee, K. Matthews, J. H. Sim, R. Choi, G. A. Brown, R. W. Murto, G. Bersuker // Japanese J. of Applied Physics. 2005. Vol. 44, № 4S. P. 2437–2440. doi: 10.1143/JJAP.44.2437

13. Kuhn M. A quasi-static technique for MOS C-V and surface state measurements // Solid-State Electronics. 1970. Vol. 13, № 6. P. 873–885. URL: https://homepages.rpi.edu/~sawyes/quasi_static_CV.pdf (дата обращения 04.05.2023)

14. Назаров М. А., Семенов Э. В. Анализ нелинейно-инерционных свойств устройств оцифровки с использованием их модели в виде нелинейного рекурсивного фильтра // Докл. ТУСУР. 2022. Т. 25, № 4. С. 110–114.

15. Singleton H. E. Theory of nonlinear transducers // MIT. Research Lab. of electronics. Tech. rep. № 100. 1950. 52 p. URL: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/4896/RLE-TR-160-04722817.pdf> (дата обращения 30.04.2023)

Информация об авторах

Назаров Максим Андреевич – младший научный сотрудник Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, младший научный сотрудник кафедры радиоэлектроники и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор 11 научных работ. Сфера научных интересов – сверхкороткоимпульсные и сверхширокополосные нелинейные измерения. Адрес: ИСЭ СО РАН, пр. Академический, д. 2/3, Томск, 634055, Россия
E-mail: mnaz90@mail.ru

Семенов Эдуард Валерьевич – доктор технических наук (2012), доцент (2009), старший научный сотрудник Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, профессор кафедры радиоэлектроники и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор более 160 научных и учебно-методических работ. Сфера научных интересов – синтез нелинейных моделей элементов и устройств для импульсных режимов; измерение нелинейных искажений сложных сигналов; диагностические и локационные системы с использованием нелинейного отклика на импульсные воздействия. Адрес: ИСЭ СО РАН, пр. Академический, д. 2/3, Томск, 634055, Россия
E-mail: edwardsemyonov@narod.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5470-1185>

References

1. Sobhy M. I., Hosny E. A., Ng M. W. R., Bakkar E. A. Nonlinear System and Subsystem Modeling in the Domain. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1996, vol. 44, iss. 12, pp. 2571–2579. doi: 10.1109/22.554605

2. Pedro J. C., Maas S. A. A Comparative Overview of Microwave and Wireless Power-Amplifier Behavioral Modeling Approaches. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2005, vol. 53, iss. 4, pp. 1150–1163. doi: 10.1109/TMTT.2005.845723

3. Root D. E., Wood J., Tuffillaro N., Schreurs D., Pekker A. Systematic Behavioral Modeling of Nonlinear Microwave/RF Circuits in the Time Domain Using Techniques from Nonlinear Dynamical Systems. Proc. of the 2002 IEEE Intern. Workshop on Behavioral

Modeling and Simulation, Santa Rosa, 08 Oct, 2002, pp. 71–74. doi: 10.1109/BMAS.2002.1291060

4. Root D. E., Verspecht J., Sharrit D., Wood J., Cognata A. Broadband Poly-Harmonic Distortion (PHD) Behavioral Models from Fast Automated Simulations and Large-Signal Vectorial Network Measurements. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2005, vol. 53, iss. 11, pp. 3656–3664. doi: 10.1109/TMTT.2005.855728

5. Qi H., Benedikt J., Tasker P. A Novel Approach for Effective Import of Nonlinear Device Characteristics into CAD for Large Signal Power Amplifier Design. IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest, San Francisco, 11–16 June 2006, pp. 477–480. doi: 10.1109/MWSYM.2006.249596

6. Woodington S., Williams T., Qi H., Williams D., Pattison L., Patterson A., Lees J., Benedikt J., Tasker P. J. A Novel Measurement Based Method Enabling Rapid Extraction of a RF Waveform Look-Up Table Based Behavioral Model. 2008 IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest, Atlanta, 15–20 June 2008, pp. 1453–1456. doi: 10.1109/MWSYM.2008.4633053

7. Amini A. R., Boumaiza S. Time-Invariant Behavioral Modeling for Harmonic Balance Simulation Based on Waveform Shape Maps. 2015 IEEE MTT-S Intern. Conf. on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), Ottawa, 11–14 Aug. 2015, Acc. no. 15805288. doi: 10.1109/NEMO.2015.7415098

8. Morgan D. R., Ma. Z., Kim J., Zierdt M. G., Pastalan J. A generalized Memory Polynomial Model for Digital Predistortion of RF Power Amplifiers. IEEE Trans. on Signal Processing. 2006, vol. 54, iss. 10, pp. 3852–3860. doi: 10.1109/TSP.2006.879264

9. Tarantola A. Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation. Soc. ind. appl. math. 2005, 354 p. doi: 10.1137/1.9780898717921

10. Semyonov E. V. Simple Behavioral Model of Baseband Pulse Devices in the Form of a Second-Order Nonlinear Recursive Filter. IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2021, vol. 68, iss. 6, pp. 2192–2196. doi: 10.1109/TCSII.2020.3048819

11. Semyonov E. V. Synthesis of Behavioral Models for Circuits with Nonlinearity Less Than Model Error. IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2023, vol. 70, iss. 6, pp. 2216–2220. doi: 10.1109/TCSII.2022.3231873

12. Young C. D., Zhao Y., Pendley M., Lee B. H., Matthews K., Sim J. H., Choi R., Brown G. A., Murto R. W., Bersuker G. Ultra-Short Pulse Current–Voltage Characterization of the Intrinsic Characteristics of High- κ Devices. Japanese J. of Applied Physics. 2005, vol. 44, no. 4S, pp. 2437–2440. doi: 10.1143/JJAP.44.2437

13. Kuhn M. A Quasi-Static Technique for MOS C-V and Surface State Measurements. Solid-State Electronics. 1970, vol. 13, no. 6, pp. 873–885. Available at: https://homepages.rpi.edu/~sawyres/quasi_static_CV.pdf (accessed 04.05.2023)

14. Nazarov M. A., Semyonov E. V. Simple Behavioral Model of a Recording Device Using a Second-Order Non-Linear Recursive Filter. Proc. of TUSUR University. 2022, vol. 25, no. 4, pp. 110–114. (In Russ.)

15. Singleton H. E. Theory of Nonlinear Transducers. MIT. Research Lab. of electronics. Tech. rep. № 100. 1950, 52 p. Available at: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/4896/RLE-TR-160-04722817.pdf> (accessed 30.04.2023)

Information about the authors

Maxim A. Nazarov – junior researcher of Institute of High Current Electronics SBRAS, junior researcher of the Department of Radioelectronics and Communication Systems of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 11 scientific publications. Area of expertise: ultra-short pulse and ultra-wideband non-linear measurements.

Address: IHCESBRAS, 2/3, Akademicheskoy Ave., Tomsk 634055, Russia

Email: mnaz90@mail.ru

Edward V. Semyonov – Dr Sci. (Eng.) (2012), Associate Professor (2009), Senior Researcher of Institute of High Current Electronics SBRAS, Professor of the Department of Radioelectronics and Communication Systems of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: synthesis of nonlinear models for elements and devices at pulse impacts; measurement of nonlinear distortions of complex signals; diagnostic and radar systems with analysis of nonlinear response to pulse impacts.

Address: IHCESBRAS, 2/3, Akademicheskoy Ave., Tomsk 634055, Russia

E-mail: edwardsemyonov@narod.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5470-1185>

Универсальный гироскопический инклинометр на базе единственного одноосного датчика угловой скорости

Я. И. Биндер, И. А. Хазов ✉

АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации",
Санкт-Петербург, Россия

✉ IvanHazov@okb3d.com

Аннотация

Введение. Сегодня универсальность и надежность гироскопических инклинометров (ГИ) более, чем точность, определяют их комплектацию и конструктивный облик. Императивные условия универсальности: диаметр 42...44.5 мм и совмещение функций съемки точечной и непрерывной; а безотказность определяется, прежде всего, робастностью основных элементов. Принципиальна "адаптивность" к траектории – "равноточность" в рабочем диапазоне зенитных углов, определяющем выбор ориентации датчиков угловой скорости (ДУС) при их неполном (< 3) числе. По совокупности критериев габаритов и точности сегодня преимущественно применяются двухосные динамически настраиваемые гироскопы, но их упругий подвес при частых операциях "зарезки боковых стволов" (из ранее пробуренных), сопровождаемых ударами большой интенсивности, постепенно деградирует.

Цель работы. Создать недорогой универсальный ГИ, сохраняющий компромисс ударостойкости и точности (сопоставимой с волоконно-оптическими ДУС), на базе одноосного кольцевого вибрационного гироскопа (КВГ) с резонатором индукционного типа, выполненным по MEMS-технологии.

Материалы и методы. Метод многопозиционного компасирования при единственном одноосном ДУС реализуется переходом от одновременных двухосных измерений к одноосным – в пяти последовательных (через 90°) положениях рамки по углу отклонителя. Экспериментальные материалы о дрейфах выбранного КВГ позволяют статистическими методами построить вариацию Аллана, которая подтверждает, что предложенная методика по сравнению с базовой не увеличивает общего времени компасирования. Непрерывный режим такого ГИ, исследованный методами решения дифференциальных уравнений, требует удержания входной оси ДУС около апсидальной плоскости с помощью той же поворотной рамки.

Результаты. Полученные соотношения подтверждают: тактико-технические характеристики ГИ с одноосным ДУС примерно соответствуют традиционной двухосной схеме. К тем же выводам приводят результаты математического моделирования съемки типового нефтегазового ствола.

Заключение. Описанный ГИ, содержащий единственный ДУС с косвенной стабилизацией входной оси, – итог последовательного развития подхода к использованию неполной информации.

Ключевые слова: гироскопический инклинометр, продольная схема, двухосный ДУС, одноосный ДУС, динамически настраиваемый гироскоп, кольцевой вибрационный гироскоп

Для цитирования: Биндер Я. И., Хазов И. А. Универсальный гироскопический инклинометр на базе единственного одноосного датчика угловой скорости // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 133–148. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-133-148

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.03.2023; принята к публикации после рецензирования 14.08.2023; опубликована онлайн 28.09.2023



Versatile Gyroinclinometer Based on a Single Axis Angular Rate Sensor

Yakov I. Binder, Ivan A. Khazov ✉

"Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation" JSC,
St. Petersburg, Russia

✉ IvanHazov@okb3d.com

Abstract

Introduction. Currently, the versatility and reliability of gyroscopic inclinometers (GI), more than accuracy, determine their configuration and design. Imperative conditions for versatility include a diameter of 42...44.5 mm and a combination of point and continuous survey modes. Reliability is primarily determined by the robustness of the main elements. The fundamental parameter is adaptability to the trajectory, in other words, equal accuracy in the operating range of zenith angles, which determines the choice of orientation of the angular velocity sensors (ARS) with incomplete (< 3) number of their axis. Presently, biaxial dynamically tuned gyroscopes (DNG) are widely used due to their dimension and accuracy criteria; however, their elastic suspension gradually degrades as a result of frequent sidetracking operations (from previously drilled ones) accompanied by high-intensity impacts.

Aim. To develop an inexpensive versatile GI that maintains a balance between shock resistance and accuracy (comparable to fiber-optic ARS) based on a single-axis vibrating ring gyroscope (VRG) with an induction-type resonator made using MEMS technology.

Materials and methods. The method of multi-position compassing with a single uniaxial ARS was implemented by transition from simultaneous biaxial measurements to uniaxial measurements in five successive positions of the frame (through 90°) along the toolface angle. Experimental data on the drifts of the selected VRG allow statistical methods to be used to construct an Allan-variance plot to confirm that the proposed method does not increase the total compassing time compared to the basic one. The continuous mode of such a GI, studied by solving differential equations, requires holding the input axis of the ARS near the apsidal plane using the same rotating frame.

Results. The obtained ratios confirm that the performance characteristics of a GI with a uniaxial ARS approximately correspond to the conventional biaxial scheme. These conclusions were also confirmed by the mathematical modeling of a survey of a typical oil and gas well.

Conclusion. The described GI containing a single ARS with indirect stabilization of the input axis is the result of a consistent development of the approach to the use of incomplete information.

Keywords: gyroinclinometer, longitudinal scheme, two-axis ARS, single-axis ARS, dynamically tuned gyroscope, vibrating ring gyroscope

For citation: Binder Ya. I., Khazov I. A. Versatile Gyroinclinometer Based on a Single Axis Angular Rate Sensor. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 133–148. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-133-148

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 20.03.2023; accepted 14.08.2023; published online 28.09.2023

Введение. Рынки как собственно скважинных гироскопических инклинометров (ГИ), так и соответствующих сервисных услуг переживают в настоящее время вполне определенную стагнацию. Она вызвана, прежде всего, ускорением тенденцией к уменьшению времени строительства новых скважин и, соответственно, к росту удельной стоимости времени скважинных работ. Инклинометрическая съемка ранее пробуренной обсаженной скважины, проводи-

мая с целью окончательной паспортизации ее траектории для реестровых документов, требует обычно от 4...6 ч до полусуток. Это время необходимо для монтажа геофизического подъемника, подготовки устья скважины, тестирования оборудования в устье перед спуско-подъемной операцией (СПО), начальной выставки (гироскопирования (ГК) или внешнего курсоуказания) ГИ, собственно СПО с эксплуатационными и тактико-техническими

ограничениями по скорости, неизбежными запланированными (для повторного ГК и/или коррекции уходов гироскопов) и еще более частыми внеплановыми и т. п. остановками и т. д. [1–3]. Определенное время отнимает камеральная (апостериорная) обработка результатов, а в случае выявления в ее ходе существенных отклонений от прогнозированной траектории может потребоваться и повторный замер. Однако если совсем еще недавно, в начале века, эти часы соответствовали нескольким единицам (а то и долям) процентов от общего времени строительства скважины, что было вполне допустимо, то при нынешних технологиях проходки время съемки может достигать 10 % от общего времени строительства. В совокупности с относительно высокой ценой и известной "капризностью" ГИ (как и любого инерциального модуля) при обслуживании это ведет к тому, что гироинклинометрическая съемка все чаще уступает свою роль так называемой геонавигации [4–6], осуществляемой непосредственно в процессе разбуривания стволов. С помощью целого ряда различных зондов (датчиков, измеряющих скважинные параметры различной физической природы) получают информацию, характеризующую положение, в том числе ориентацию, бурового инструмента относительно продуктивного пласта флюида (нефти или газа), его кровли и подошвы. При этом к точности выработки абсолютных (географических или в местной системе) координат, одновременно получаемых по данным феррозондовых инклинометров в процессе бурения, требования могут быть предъявлены не столь высокие, как при гироинклинометрической съемке обсаженных скважин [7].

Из вышеизложенного, разумеется, не следует делать выводы об утрате профильным рынком интереса к ГИ, использование которых безальтернативно для ряда задач геофизической съемки. Можно отметить другое: более высокими, нежели снижение погрешностей, приоритетами для этого рынка в настоящее время является повышение иных эксплуатационных требований, в частности, к универсальности и надежности ГИ, имеющих определяющее значение для его комплектации и конструктивного облика. Так, в XXI в. универ-

сальным может считаться только прибор с диаметром 42...44.5 мм (1.75" по стандарту SPE). Это условие императивное. Далее следует упомянуть требование совмещения функций съемки точечной и непрерывной [8]. Последняя уже давно считается обеспечивающей максимально возможную для имеющегося набора датчиков первичной информации (ДПИ) точность, но ее нижней границей остается погрешность точечного ГК при начальной выставке. Значимым для универсального ГИ следует считать и необходимость обеспечения его "равноточности" во всем диапазоне зенитных углов скважины – от вертикального положения в устье ($\theta = 0^\circ$) до сколь угодно близких к 90° (и даже превышающих его на "восходящих" стволах) зенитных углов. При этом необходимо принять во внимание, что значениями θ однозначно определяется предпочтительность той или иной ориентации гироскопических датчиков угловой скорости (ДУС) при неполном (< 3) числе их входных осей [9].

Наконец, еще одна, постоянно ставящаяся перед ГИ задача: азимутальная выставка "клина-отклонителя" при зарезке бокового ствола (ЗБС) из ранее (чаще всего, давно) пробуренного вертикального ствола [10–12]. При ее решении взаимные противоречия базовых требований, предъявляемых к ГИ, достигают апогея. Дело в том, что ЗБС сопровождается интенсивным (до 100 кН) ударным воздействием [13–15], возникающим при срезании шпильки, с помощью специальной оснастки закрепляющей корпус ГИ на теле клина-отклонителя. Удары для традиционных гироскопов, обладающих механическим подвесом, в принципе неблагоприятны, причем по мере роста требований к точности ДУС при одних и тех же воздействиях приходится переходить от проблематики ударостойкости к категории ударопрочности. Ожидания потребителей при выставке клина-отклонителя (несколько градусов, до пяти и даже выше), казалось бы, не очень высоки, но единственный способ их удовлетворения – точечное компасирование, погрешность которого зависит от дрейфа ДУС следующим образом [16]: $\Delta A = \Delta\omega / (\Omega \cos \varphi)$, где A – азимут скважины; Ω – угловая скорость вращения Земли; φ – широта места; $\Delta\omega$ – уход ДУС.

Таким образом, принимая во внимание регионы преимущественного нефтегазового залежания России, приходим к выводу об уровне требований к уходу ДУС, каковые вполне можно отнести к навигационно-тактическому классу – $0.2...0.5$ °/ч [17, 18]. Однако упомянутые требования по ударостойкости при ЗБС сегодня коррелируются только с производимыми в соответствии с MEMS-технологиями микромеханическими гироскопами, наиболее прецизионные (и – назовем вещи своими именами – практически недоступные на открытом рынке) из которых пока еще не менее чем на порядок уступают по точности требуемым вышеприведенным характеристикам [19]. В этих условиях, с учетом массогабаритных и иных эксплуатационных ограничений самым востребованным, а по существу – единственным ДУС, нашедшим применение в универсальных ГИ, как в отечественных (МИГ-42, УГИ-42), так и в зарубежных ГИ (RGS-CT, Gyrodata, USA, SPT 007/42, SPT, Stockholm) стал двухосный динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ). Будучи установлен на поворотной рамке при ориентации вектора кинетического момента по оси скважины, он реализует так называемую продольную (или ХУ) схему [9], позволившую, хотя и известными изъятиями, добиться универсального использования ГИ. Среди ДНГ удалось найти гироскопы, позволяющие вписаться в трубные корпуса ГИ с указанными выше диаметрами, с приемлемыми для скважинной навигации точностными характеристиками и термоустойчивостью. Однако упругий подвес ДНГ чрезвычайно чувствителен к внешним механическим нагрузкам, в силу чего сопровождающие выставку клина-отклонителя значительные ударные воздействия приводят к его постепенной деградации и потере точностных характеристик прибора после некоего ограниченного числа операций ЗБС. Последующие попытки вернуться к использованию такого ГИ для инклинометрической съемки, требуемая точность которой существенно выше, обычно не дают приемлемого результата. Дальнейшее использование прибора для таких задач потребует его дорогостоящего заводского ремонта, сопровождаемого, как правило, заменой гироскопа. Но и отказавшись от задач съемки в пользу постоянного

использования ГИ для ЗБС, нельзя быть уверенным в том, что он будет соответствовать своим расчетным ресурсным характеристикам.

Цель работы. Занимаясь в течение длительного времени вопросами разработки, изготовления и эксплуатации ГИ, авторы данной статьи понимали, что скорейшее достижение принципиально новых потребительских качеств, и прежде всего сочетания желаемого уровня эксплуатационной надежности с универсализацией этих приборов, возможно только по мере интеграции MEMS-технологий в каком-то из сегментов инерциальных чувствительных элементов (ЧЭ).

Теперь, когда появились кольцевые вибрационные гироскопы (КВГ) с ЧЭ индукционного типа, выполненными по MEMS-технологии, с неограниченной практически ударопрочностью, высокой ударо- и термоустойчивостью и стабильностью дрейфа, сопоставимой с волоконно-оптическими и лазерными ДУС ($\sim 10^{-1}$ °/ч), проблема создания дешевого, робастного ГИ, пригодного для решения любых задач позиционирования скважин, может быть решена [20].

Гироскоп с одноосным ДУС. Приступая к обсуждению конструктивного облика, кинематической схемы, режимов управления и алгоритмов обработки информации проектируемого ГИ, выделим определяющие технические новации, либо вновь привнесенные в разработку, либо ранее просто не использовавшиеся. К первым следует отнести то, что, оставаясь единственным, новый ДУС, в отличие от ДНГ, является одноосным. Ко вторым – функциональное расширение применения поворотной рамки, режим использования которой при стандартном построении продольной схемы ГИ – многопозиционное компасирование [16] в точечном режиме (в УГИ-42.03 еще и в непрерывном режиме для автокомпенсации "корпусных" дрейфов по методу МУДР [21, 22]). В совокупности эти базовые свойства разработки подсказывают направление поиска новой схемы ГИ, использующей единственный одноосный ДУС, что заметно удешевляет изделие, а также упрощает его схемно-конструктивное исполнение, позитивно сказываясь на надежности.

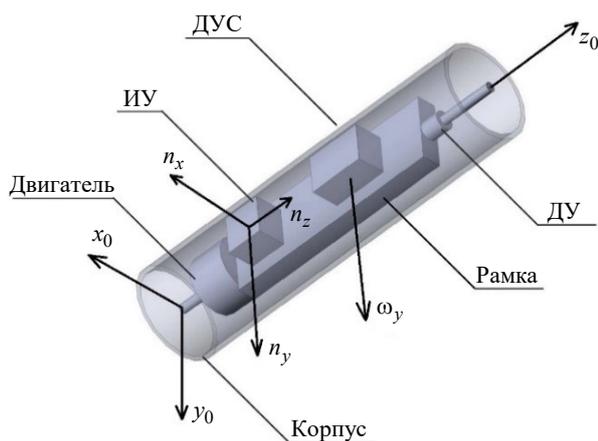


Рис. 1. ГИ с одноосным ДУС

Fig. 1. Gyroinclinometer with a single-axis angular rate sensor

Предлагаемая кинематическая схема скважинного прибора (СП) ГИ приведена на рис. 1.

Основным элементом конструкции является подвижная рамка, которая разворачивается с помощью двигателя с редуктором вокруг продольной оси на заданный угол, измеряемый датчиком угла (ДУ) поворота. На рамке размещается одноосный ДУС с осью чувствительности, лежащей в плоскости поперечного сечения СП, блок акселерометров (измеритель ускорений трехосный, ИУТ) и электронные платы. В точечном режиме работы ГИ развороты рамки должны обеспечить многопозиционное ГК, аналогично традиционной продольной (ХУ) схеме с двухосным ДУС [9], однако, в отличие от нее, возможность управления положением рамки в одноосной схеме – условие, необходимое для самого ее существования.

На рис. 1 не показан токоподвод, осуществляющий транзит питающих и сигнальных токоведущих линий между подвижной и неподвижной составными частями ГИ. Основой для его конкретного исполнения могут быть различные физические принципы гальванической или бесконтактной (индуктивной, оптической и т. д.) связи, которые здесь не рассматриваются. Принципиальным для дальнейшего синтеза алгоритмов управления ГИ в различных режимах является наличие или отсутствие ограничения для разворота токоподвода. Как следует из дальнейшего изложения, точечный режим ГК может быть обеспечен не только при неограниченной свободе вращения рамки, но и

при использовании "гибкого жгута", ограничивающего ее не более чем одним оборотом.

В непрерывном режиме выходные сигналы ДУС, ИУТ и ДУ поступают в бортовой вычислитель, где формируется закон управления приводом разворота рамки, парирующий вращение СП вокруг его продольной оси, вызванное, главным образом, так называемым моторным эффектом (крутильными колебаниями геофизического кабеля, на котором производится СПО ГИ). Это необходимо для удержания оси чувствительности ДУС в требуемом положении, т. е. в апсидальной плоскости (АП) ГИ [9]. В связи с ожидаемым выводом на рынок ГИ с обоими типами токоподводов следует обратить внимание на то, что возможность неограниченного вращения рамки сводит необходимый закон управления ею к "грубой" стабилизации около АП. Конструктивно более простой – назовем его "бюджетным" – вариант ГИ с "гибким жгутом", рекомендуемый потребителю, специализирующемуся на проведении точечных замеров (например, при ранее упомянутой выставке клина-отклонителя), в общем случае требует в непрерывном режиме реализации нетривиальных алгоритмов управления движением рамки. Их рассмотрение не является предметом данной статьи, а включение в комплект поставки программного обеспечения, реализующего эти алгоритмы, предполагается опционально – по запросу потребителя.

Многопозиционное компасирование на наклонном участке скважины. Под "точечным" в инклинометрической практике понимается проведение измерений на остановках в выбранных согласно тем или иным критериям точках траектории. "Многопозиционным" принято называть нахождение азимута методом компасирования при определенных ориентациях гироскопа(ов) с последующей совместной обработкой результатов этих измерений в целях повышения точности.

В условиях остановки в точках траектории скважины единственным способом управления ориентацией ДУС являются конструктивно предусмотренные развороты по углу "отклонителя" (ψ) рамки, на которой установлены инерциальные элементы (рис. 2). Далее приводятся сопровождаемые некоторыми аналитическими выкладками соображения, обосновывающие пред-

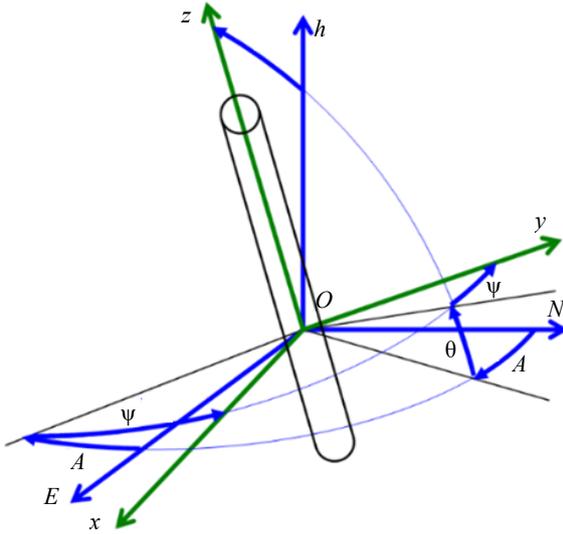


Рис. 2. Скважинная система координат

Fig. 2. Borehole coordinate system

лагаемые методики многопозиционного компасирования схемы с одним одноосным ДУС.

Как и упомянутые здесь же для сопоставления методики, ранее разработанные для двухосных ДУС, они используют ту же аксиоматику [23]: g -зависимые дрейфы полагаются только систематическими, т. е. все коэффициенты их модели дрейфа считаются константами, заранее определенными при заводской калибровке, а так называемый корпусный, не связанный с ориентацией гироскопа относительно вектора силы тяжести, уход является суммой случайной константы и линейного тренда с постоянной на ограниченном промежутке времени случайной скоростью.

Далее приведем основные соотношения, необходимые для описания режима точечного компасирования, независимо от количества используемых ДУС, их ориентации и т. д.

Три угла (рис. 2): азимут A , зенитный угол θ и угол ψ определяют положение системы координат $Oxyz$, связанной с корпусом СП, относительно географического трехгранника ENh [16]. На основании полученных значений A , θ в каждой точке проведения измерения с помощью ГИ, а также длины колонны труб или геофизического кабеля формируются координаты траектории скважины.

Углы θ и ψ вычисляются по показаниям составляющих ускорения свободного падения n_x , n_y , n_z , измеряемых ИУТ:

$$\psi = \arctg\left(\frac{n_y}{n_x}\right); \theta = \arctg\left(\frac{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}{n_z}\right).$$

Проекции угловой скорости вращения Земли Ω на оси $Oxyz$ имеют вид:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \Omega \sin \varphi \sin \theta \sin \psi - \Omega \cos \varphi \times \\ &\times (\sin A \cos \psi + \cos A \cos \theta \sin \psi) + \Delta\omega_x; \\ \omega_y &= \Omega \sin \varphi \sin \theta \cos \psi + \Omega \cos \varphi \times \\ &\times (\sin A \sin \psi + \cos A \cos \theta \cos \psi) + \Delta\omega_y; \\ \omega_z &= \Omega \sin \varphi \cos \theta - \Omega \cos \varphi \sin \theta \cos A + \Delta\omega_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Delta\omega_i$ ($i=x, y, z$) – проекции дрейфа ДУС на соответствующие оси.

Уравнения (1) подсказывают идею компасирования при наличии единственного одноосного ДУС с измерительной осью, расположенной в плоскости поперечного сечения СП. Если в схеме XU однократное вычисление $\sin A$, $\cos A$ принципиально возможно при любых углах ψ , то в данном случае базовый алгоритм требует выполнения измерений при двух значениях этого угла, которым, в целях максимизации "наблюдаемости", желательно отличаться друг от друга на 90° .

Сопутствующая задача, чрезвычайно важная с точки зрения точности компасирования, – исключение влияния не зависящих от силы тяжести дрейфов ДУС – также решается с помощью дополнительных разворотов на углы, кратные 90° , аналогично тому, как это реализовано в схеме XU . В ней, напомним, используются развороты рамки: от положения (обозначим его ψ_{01}), в котором производится первое измерение, осуществляется разворот на 180° (в положение ψ_{180}) для второго измерения, а затем – возврат в начальное положение (ψ_{02}) для третьего измерения [23].

Из (1) нетрудно получить следующий алгоритм:

$$\omega_i = \frac{\omega_{\psi_{01}}^i + \omega_{\psi_{02}}^i - \omega_{\psi_{180}}^i}{2},$$

где $i = [x, y]$. Результатом его использования является компасирование, свободное от влия-

ния g -независимых дрейфов гироскопа $\Delta\omega_i$ в предположениях о том, что их модель соответствует зависимости

$$\Delta\omega_i = \Delta\omega_{0i} + \Delta\dot{\omega}_{0i}\tau, \quad (2)$$

где $\Delta\omega_{0i}$ – постоянная составляющая ухода гироскопа; $\Delta\dot{\omega}_{0i}$ – составляющая ухода, линейно меняющаяся со временем.

При этом время проведения компасирования τ в каждой точке не меняется, будучи много больше времени перевода рамки из точки в точку.

В схеме с одним одноосным ДУС, являющейся предметом данной статьи, для аналогичного построения ГИ потребуется использование пяти положений по углу отклонителя. Это позволяет получать значения азимута скважины, свободные от влияния g -независимого дрейфа гироскопа, который на сравнительно малом интервале времени (о его длительности см. далее) можно описать выражением (2).

С учетом (2) в пяти последовательных положениях рамки по углу отклонителя, т. е. добавив к ранее введенным $(\psi_{0_1}, \psi_{180}, \psi_{0_2})$ ψ_{90} и ψ_{270} , получаем следующие выражения для выходного сигнала ДУС:

$$\begin{cases} \omega_{0_1} = \omega_{x_1} + \Delta\omega_0 + \Delta\dot{\omega}_0\tau; \\ \omega_{90} = \omega_{x_2} + \Delta\omega_0 + \Delta\dot{\omega}_0 2\tau; \\ \omega_{180} = -\omega_{x_1} + \Delta\omega_0 + \Delta\dot{\omega}_0 3\tau; \\ \omega_{270} = -\omega_{x_2} + \Delta\omega_0 + \Delta\dot{\omega}_0 4\tau; \\ \omega_{0_2} = \omega_{x_1} + \Delta\omega_0 + \Delta\dot{\omega}_0 5\tau, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \omega_{x_1} &= \Omega \sin \varphi \sin \theta \sin \psi_{0_1} - \Omega \cos \varphi \times \\ &\times (\sin A \cos \psi_{0_1} + \cos A \cos \theta \sin \psi_{0_1}) + \Delta\omega_{x_1}; \\ \omega_{x_2} &= \Omega \sin \varphi \sin \theta \cos \psi_{0_1} + \Omega \cos \varphi \times \\ &\times (\sin A \sin \psi_{0_1} + \cos A \cos \theta \cos \psi_{0_1}) + \Delta\omega_{x_2}; \end{aligned}$$

$\Delta\omega_{x_1}, \Delta\omega_{x_2}$ – нескомпенсированные составляющие ухода гироскопа.

Пять уравнений (3) содержат 4 неизвестных $\omega_{x_1}, \omega_{x_2}, \Delta\omega_0, \Delta\dot{\omega}_0$. Такая система с избы-

точностью может быть решена любым методом оценивания, в частности методом наименьших квадратов. Здесь же покажем принципиальную возможность определения ω_{x_1} и ω_{x_2} :

$$\begin{aligned} \omega_{x_1} &= \frac{\omega_{0_1} + \omega_{0_2} - \omega_{180}}{2}; \\ \omega_{x_2} &= \frac{\omega_{90} - \omega_{270}}{2} + (\omega_{180} - \omega_{0_1} + 2\omega_{x_1}). \end{aligned} \quad (4)$$

Для определения желательной длительности компасирования τ имеет смысл руководствоваться критериями достижения допустимого уровня погрешностей кривыми вариации Аллана для ДУС (например, рис. 3) и ИУТ (например, рис. 4). В то же время, необходимо принимать во внимание и эксплуатационные соображения, в данном случае – ограничение времени точечного компасирования, определяемое предельным временем, выделяемым для съемки скважины, и заданным количеством точек. Как правило (исключение – начальная выставка в устье скважины), время для обработки одной точки траектории не должно превышать 4 мин. По совокупности изложенных здесь соображений, в данном случае полагаем $\tau = 40$ с.

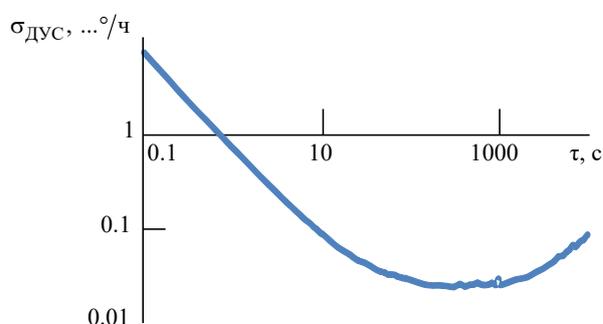


Рис. 3. Вариация Аллана для ДУС

Fig. 3. Allan Variance for angular rate sensor

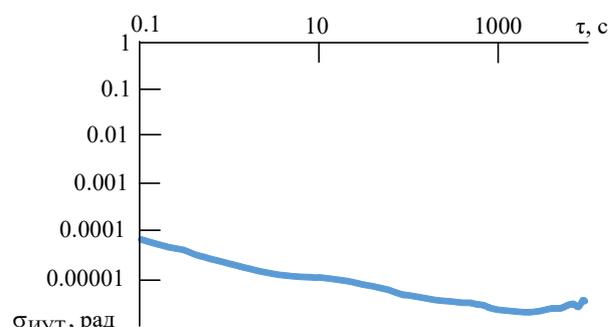


Рис. 4. Вариация Аллана для акселерометра

Fig. 4. Allan Variance for accelerometer

С учетом (4) получим следующие выражения для вычисления тригонометрических функций $\sin A$ и $\cos A$ в этой схеме:

$$\sin A = \frac{-\omega_{x1} \cos \psi_{01} + \omega_{x2} \sin \psi_{01}}{\Omega \cos \varphi}; \quad (5)$$

$$\cos A = \frac{\omega_{x1} \sin \psi_{01} + \omega_{x2} \cos \psi_{01} - \Omega \sin \varphi \sin \theta}{\Omega \cos \varphi \cos \theta}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) получим формулу для вычисления $\operatorname{tg} A$:

$$\operatorname{tg} A = \frac{(-\omega_{x1} \cos \psi_{01} + \omega_{x2} \sin \psi_{01}) \cos \theta}{\omega_{x1} \sin \psi_{01} + \omega_{x2} \cos \psi_{01} - \Omega \sin \varphi \sin \theta}. \quad (7)$$

Легко показать, что при использовании в ГИ одного одноосного ДУС режим точечного компасирования, построенный в соответствии с алгоритмами (5), (7), обладает всеми свойствами продольной схемы (ХУ) на базе двухосного ДУС [16].

Варьируя (5) и (7), получим соответственно следующие выражения для погрешности ΔA :

$$\Delta A \cos A = \frac{-\Delta \omega_{x1} \cos \psi_{01} + \Delta \omega_{x2} \sin \psi_{01}}{\Omega \cos \varphi} + \frac{\Delta n_{xy}}{g \sin \theta} (\cos \theta \cos A + \operatorname{tg} \varphi \sin \theta); \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta A = & \frac{-\Delta \omega_{x1}}{\Omega \cos \varphi \cos \theta} \times \\ & \times (\cos A \cos \theta \cos \psi_{01} + \sin A \sin \psi_{01}) + \\ & + \frac{\Delta \omega_{x2} (\cos A \cos \theta \sin \psi_{01} - \sin A \cos \psi_{01})}{\Omega \cos \varphi \cos \theta} + \\ & + \frac{\Delta n_{xy}}{g \sin \theta} \times \\ & \times \left(\sin \theta \cos A \operatorname{tg} \varphi + \frac{\sin^2 A + \cos^2 A \cos^2 \theta}{\cos \theta} \right) + \\ & + \frac{(\Delta n_{yx} \cos \theta + \Delta n_z \sin \theta) \sin A}{g \cos \theta} \times \\ & \times (\cos \theta \operatorname{tg} \varphi - \sin \theta \cos A), \quad (9) \end{aligned}$$

где $\Delta n_{xy} = \Delta n_x \cos \psi_{01} - \Delta n_y \sin \psi_{01}$; $\Delta n_{yx} = \Delta n_x \times \sin \psi_{01} + \Delta n_y \cos \psi_{01}$ – ошибки ИУТ, приведенные к апсидальной плоскости ($\Delta n_x, \Delta n_y,$

Δn_z – погрешности соответствующих акселерометров).

Анализ погрешностей (8), (9) показывает, что в рассматриваемой схеме, как и в схеме ХУ, при условии $|\operatorname{tg} A| < \left| \frac{1}{\cos \theta} \right|$ для измерения азимута скважины целесообразно воспользоваться алгоритмом (5), погрешность которого не зависит от $\sec \theta$, в противном случае – алгоритмом (7) [16].

Для применяемого в схеме ДУС справедливо соотношение

$$\sigma_{\Delta \omega_{x1}}^2 = \sigma_{\Delta \omega_{x2}}^2 = \sigma_{\Delta \omega_x}^2,$$

где $\sigma_{\Delta \omega_x}^2$ – дисперсия погрешности ДУС. Следовательно, дисперсии ΔA , вычисляемые по (8) и (9), при учете только погрешностей ДУС $\Delta \omega_{x1}$ и $\Delta \omega_{x2}$ будут определяться следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta A}^2 &= \frac{\sigma_{\Delta \omega_x}^2}{\Omega^2 \cos^2 \varphi \cos^2 A}; \\ \sigma_{\Delta A}^2 &= \frac{\sigma_{\Delta \omega_x}^2 (\sin^2 A + \cos^2 A \cos^2 \theta)}{\Omega^2 \cos^2 \varphi \cos^2 \theta}. \end{aligned}$$

Данные формулы подтверждают сделанное ранее предположение об идентичности точностных характеристик рассматриваемого построения ГИ с одним одноосным ДУС и схемы ХУ. При этом имеется в виду, что учет погрешностей ИУТ для обоих вариантов ГИ особенностей не имеет.

Многопозиционное компасирование на вертикальном участке скважины. Под "вертикальными" в геофизической практике понимаются стволы скважин, зенитный угол которых составляет первые единицы градусов. Численные характеристики "вертикальности" варьируются в зависимости от ряда факторов: конкретной задачи, режима перемещения ГИ, инструментальных погрешностей ИУТ и т. д., однако они не имеют принципиального значения. Практически все нефтегазовые стволы (а это более 90 % протяженности скважин всех видов и разного назначения) забуриваются вер-

тикально, да и в целом ряде случаев математическое ожидание зенитного угла на весьма протяженных участках траектории является нулевым. В частности, это касается задачи выставки клина-отклонителя, упомянутой во вводной части настоящей статьи. Это связано с тем, что забуривание так называемых вторых стволов чаще всего производится из номинально вертикальных "первых" стволов старого фонда.

Как бы то ни было, из рис. 2 очевидно, что при $\theta \rightarrow 0$ угол A вырождается, и при этом уравнения (1) теряют информационный смысл. В этом случае вместо ранее введенных для наклонного участка скважины углов Эйлера имеет смысл ввести углы μ , ν и Φ (рис. 5) [24] и матрицу направляющих косинусов C_k^h между трехгранниками ENh и $Oxyz$:

$$C_k^h = \begin{matrix} & x & y & z \\ E \begin{bmatrix} \cos \nu \cos \Phi & -\cos \nu \sin \Phi & \sin \nu \\ \cos \mu \sin \Phi + \sin \mu \sin \nu \cos \Phi & \cos \mu \cos \Phi - \sin \mu \sin \nu \sin \Phi & -\cos \nu \sin \mu \\ \sin \mu \sin \Phi - \cos \mu \sin \nu \cos \Phi & \sin \mu \cos \Phi + \cos \mu \sin \nu \sin \Phi & \cos \nu \cos \mu \end{bmatrix} \\ N \\ h \end{matrix}$$

Здесь руководствуемся следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \sin \mu &= \frac{n_x \sin \Phi + n_y \cos \Phi}{g}; \\ \sin \nu &= \frac{-n_x \cos \Phi + n_y \sin \Phi}{g \cos \mu}, \end{aligned} \quad (10)$$

где n_x , n_y – выходные сигналы ИУТ по осям Ox и Oy соответственно.

Составляющие угловой скорости по осям Ox и Oy системы координат $Oxyz$ определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \Omega \sin \varphi \times \\ &\times (\sin \mu \sin \Phi - \cos \mu \sin \nu \cos \Phi) + \\ &+ \Omega \cos \varphi (\cos \mu \sin \Phi + \sin \mu \sin \nu \cos \Phi); \\ \omega_y &= \Omega \cos \varphi \times \\ &\times (\cos \mu \cos \Phi - \sin \mu \sin \nu \sin \Phi) + \\ &+ \Omega \sin \varphi (\sin \mu \cos \Phi + \cos \mu \sin \nu \sin \Phi). \end{aligned} \quad (11)$$

Для схемы с одним одноосным ДУС по аналогии с (3) справедливы соотношения

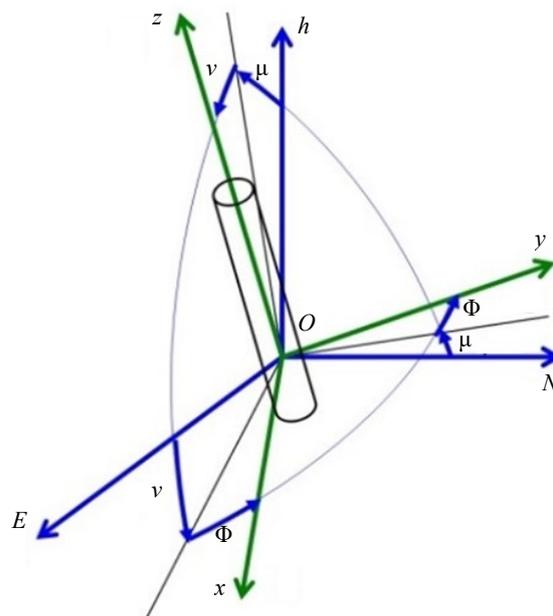


Рис. 5. Система координат для съемки вертикальных скважин

Fig. 5. Coordinate system for vertical wells surveying

$$\begin{aligned} \omega_{x1} &= \Omega \sin \varphi \times \\ &\times (\sin \mu \sin \Phi_0 - \cos \mu \sin \nu \cos \Phi_0) + \\ &+ \Omega \cos \varphi (\cos \mu \sin \Phi_0 + \sin \mu \sin \nu \cos \Phi_0); \\ \omega_{x2} &= \Omega \cos \varphi \times \\ &\times (\cos \mu \cos \Phi_0 - \sin \mu \sin \nu \sin \Phi_0) + \\ &+ \Omega \sin \varphi (\sin \mu \cos \Phi_0 + \cos \mu \sin \nu \sin \Phi_0), \end{aligned} \quad (12)$$

где Φ_0 – значение угла Φ в начале процедуры компасирования, которое определяет положение клина-отклонителя.

Тригонометрические функции для определения угла Φ_0 , исходя из (10)–(12), будут иметь вид

$$\begin{aligned} \sin \Phi_0 &= \frac{\omega_{x1} g - n_x \Omega \sin \varphi}{\Omega g \cos \varphi}; \\ \cos \Phi_0 &= \frac{\omega_{x2} g - n_y \Omega \sin \varphi}{\Omega g \cos \varphi}. \end{aligned}$$

И, следовательно, вычисление угла Φ_0 осуществляется с использованием алгоритма

$$\Phi_{01} = \arctg \frac{\omega_{x1} g - n_x \Omega \sin \varphi}{\omega_{x2} g - n_y \Omega \sin \varphi}. \quad (13)$$

Варьируя (13), получим:

$$\Delta\Phi_0 = \frac{\Delta\omega_{x1} \cos \Phi_0 - \Delta\omega_{x2} \sin \Phi_0}{\cos \varphi} - \operatorname{tg} \varphi \left(\frac{\Delta n_x}{g} \cos \Phi_0 - \frac{\Delta n_y}{g} \sin \Phi_0 \right). \quad (14)$$

При использовании равенства $\sigma_{\Delta\omega_{x1}}^2 = \sigma_{\Delta\omega_{x2}}^2 = \sigma_{\Delta\omega_x}^2$ выражение для дисперсии $\Delta\Phi_0$, учитывающее в (14) только погрешности $\Delta\omega_{x1}$, $\Delta\omega_{x2}$, будет иметь вид

$$\sigma_{\Delta\Phi_0}^2 = \frac{\sigma_{\Delta\omega_x}^2}{\Omega^2 \cos^2 \varphi}. \quad (15)$$

Представленный алгоритм вычисления угла Φ_0 (13) и полученное выражение для его погрешности (15) подтверждают отсутствие каких-либо ограничений при использовании одного одноосного ДУС в процессе компасирования на вертикальных участках скважин.

Результаты натурного моделирования.

С целью оценки погрешности режима точечного компасирования при использовании ГИ с одноосным ДУС была проведена экспериментальная проверка этого режима при установке кольцевого вибрационного микромеханического гироскопа на делительной головке, планшайба которой была выставлена относительно севера с помощью гиротеодолита.

Эксперимент проходил в условиях стенда (широта места расположения – 60° с. ш.) при комнатной температуре, начальное положение планшайбы делительной головки, на которой устанавливался ДУС, соответствовало условному нулевому положению (ψ_{01}) измерительной оси гироскопа в плоскости горизонта. Планшайба вместе с ДУС разворачивалась вокруг оси, нормальной к плоскости горизонта, относительно начального положения соответственно на углы 90° (ψ_{90}), 180° (ψ_{180}), 270° (ψ_{270}) и снова возвращалась в начальное положение (ψ_{02}) – эти положения соответствуют режиму

разворота рамки с одноосным ДУС по углу отклонителя при точечном компасировании в реальной скважине. Время осреднения выходного сигнала гироскопа в каждом положении измерительной оси ДУС составляло $\tau = 40$ с.

Таким образом, имитировался режим многопозиционного компасирования в точке "скважины" ψ_{01} . С использованием выражений (4) были получены значения ω_{x1} , ω_{x2} и в соответствии с выражением $A = \arctg \frac{\omega_{x1}}{\omega_{x2}}$ вычислялся "азимут" данной точки.

Разворачивая планшайбу в горизонте последовательно с дискретностью 10° и повторяя в каждом положении указанные ранее действия, можно получить рассчитанные значения азимута в точках "скважины", погрешности которых определялись с учетом известного эталонного значения азимута.

Результаты натурного моделирования приведены в таблице. По результатам данного эксперимента погрешности вычисления азимута ΔA в представленных точках "скважины" при использовании одного ДУС и пяти последовательных разворотов его измерительной оси по углу отклонителя не превысили значения $\pm 1.09^\circ$, что вполне отвечает современным требованиям к точности съемки скважин произвольной ориентации [25].

Непрерывная съемка наклонных стволов скважин. В непрерывном режиме работы ГИ составляющие угловой скорости вращения связанной с корпусом СП системы координат $Oxyz$ определяются соотношениями

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\theta} \cos \psi + (\Omega \sin \varphi - \dot{A}) \sin \theta \sin \psi - \\ &- \Omega \cos \varphi (\sin A \cos \psi - \cos A \cos \theta \sin \psi); \\ \omega_y &= -\dot{\theta} \sin \psi + (\Omega \sin \varphi - \dot{A}) \sin \theta \cos \psi + \\ &+ \Omega \cos \varphi (\sin A \sin \psi + \cos A \cos \theta \cos \psi); \\ \omega_z &= (\Omega \sin \varphi - \dot{A}) \cos \theta - \dot{\psi} - \Omega \cos \varphi \cos A \sin \theta. \end{aligned} \quad (16)$$

В ГИ с одной измерительной осью ДУС, лежащей в поперечной плоскости СП, алгоритм вычисления азимута может быть получен с использованием одного из первых двух уравнений (16), например:

Результаты натурного моделирования режима компасирования
 Results of compassing mode test

Сигнал ДУС в положении, ...°/ч					Расчет, ...°/ч		$\Delta A, \dots^\circ$
Ψ_{01}	Ψ_{90}	Ψ_{180}	Ψ_{270}	Ψ_{02}	ω_{x1}	ω_{x2}	
5.468	13.165	5.414	-2.033	5.548	0.047	7.639	0.35
6.97	12.954	4.309	-1.786	6.922	1.319	7.347	0.18
8.112	12.464	2.879	-1.377	8.272	2.657	7.002	0.78
9.129	11.914	1.934	-0.914	9.299	3.64	6.499	-0.75
10.287	11.553	0.879	-0.07	10.298	4.707	5.818	-1.03
11.528	10.429	-0.056	0.58	11.524	5.791	4.923	-0.37
12.115	9.427	-1.054	1.836	11.965	6.547	3.721	0.39
12.734	8.218	-1.239	3.077	12.438	6.913	2.424	0.68
12.907	6.834	-1.721	4.397	12.75	7.275	1.141	1.09
13.165	5.414	-2.033	5.548	13.262	7.623	-0.019	0.14

$$\dot{A} \sin \theta \cos \psi = -\dot{\theta} \sin \psi + \Omega \sin \phi \sin \theta \cos \psi + \Omega \cos \phi (\sin A \sin \psi + \cos A \cos \theta \cos \psi) - \omega_y. \quad (17)$$

Из первичного рассмотрения соотношения (17), выбранного для реализации алгоритма ГИ, очевидно, что при произвольном изменении угла поворота отклонителя (ψ) рассматриваемая схема с одноосным ДУС – в отличие от продольной схемы ХУ с двухосным ДУС, реализующей режим бесплатформенного ГИ [9], – неработоспособна. Для ее реализации требуется избегать значений $\cos \psi$, приближающихся к 0, т. е. управлять положением рамки относительно корпуса СП, компенсируя попадания последнего в неблагоприятные зоны. Очевидно, что наиболее естественным, с точки зрения максимизации точности ГИ, в этом случае является приблизительное удержание положения $|\cos \psi| = 1$ с помощью мотор-редуктора, управляемого вычисляемыми по данным ИУТ значениями ψ , т. е. грубая стабилизация.

Проварьбуем выражение (17), пренебрегая, с учетом времени работы $t \ll \frac{2\pi}{\Omega \cos \phi}$, членами с Ω по сравнению с угловыми скоростями изменения параметров ориентации и полагая $\psi = \Delta\psi$ (где $\Delta\psi$ – ошибка системы стабилизации). При этом учтем, что последняя есть малый угол рассогласования действительного и заданного положений рамки, обусловленный

"алгоритмической" (заведомым упрощением) или аппаратной "грубостью" системы стабилизации, но известный с погрешностью ИУТ:

$$\Delta \dot{A} \sin \theta + \Delta \theta \dot{A} \cos \theta = -\dot{\theta} \Delta \psi - \Delta \omega_y. \quad (18)$$

Известные выражения для погрешностей $\Delta \theta$ и $\Delta \psi$ [9], применительно к условиям "грубой" стабилизации, будут иметь вид:

$$\Delta \theta = \frac{\Delta n_y}{\cos \theta}; \quad \Delta \psi = \frac{\Delta n_x}{\sin \theta}. \quad (19)$$

Теперь, подставляя (19) в (18) и сравнивая его решение в квадратурах с выражением для "промаха в плане" схемы ХУ, представленным в [9], легко убедиться в их фактической идентичности:

$$\alpha = \Delta A_0 \sin \theta - \sin \theta \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{\Delta n_x d\theta}{\sin^2 \theta} - \sin \theta \int_{A_0}^A \frac{\Delta n_y dA}{\sin \theta} - \sin \theta \int_0^t \frac{\Delta \omega_y dt}{\sin \theta}. \quad (20)$$

Выбор для ИУТ акселерометров со сравнительно малыми (по отношению к корректно сопоставленным гироскопическим составляющим) инструментальными погрешностями, являющийся системообразующим фактором при проектировании ГИ, в настоящее время легко достижим уже на базе MEMS-технологий. Поэтому основная погрешность режима непрерывной съемки рассматриваемого ГИ для углов θ , не очень близких к 0° , будет, как и в схеме

ХУ, определяться дрейфом ДУС $\Delta\omega_y$ в процессе движения СП и погрешностью начальной выставки ΔA_0 , которая при автономном способе ее осуществления формируется дрейфом того же ДУС при осуществлении точечного компасирования.

Имитационное моделирование непрерывной съемки наклонных стволов скважин. Для верификации приведенных ранее расчетных оценок было проведено имитационное моделирование.

Приведем результаты моделирования работы такой схемы при съемке скважины, типичной для Быстринского месторождения (ХМАО), угловые параметры которой показаны на рис. 6 и 7 (начальное значение зенитного угла составляет 5°). Поворот корпуса СП вокруг продольной оси по углу отклонителя показан на рис. 8.

На рис. 9, 10 приведены погрешности съемки данной скважины при движении СП со скоростью 1 м/с, а также при применении в ГИ ЧЭ со следующими инструментальными погрешностями:

- постоянная ошибка одноосного ДУС (3σ) – $0.1^\circ/\text{ч}$;
- постоянная ошибка акселерометров (3σ) – $4.4 \cdot 10^{-4} g$;
- шум акселерометров (1σ) – $10'$.

В результате применения схемы ГИ при съемке рассматриваемой скважины:

- ошибка определения координат в плане $\Delta S = \sqrt{\Delta S_N^2 + \Delta S_E^2}$ (где $\Delta S_E, \Delta S_N$ – соответственно погрешности восточной и северной составляющих декартовых координат скважины) при глубине ствола 690 м не превышает значения 1.1 м (рис. 9);
- погрешность угла азимута A , накопленная за время проведения непрерывной съемки, не превышает 0.23° (рис. 10).

Что же касается стволов скважин, близких к вертикальным, то по известным причинам (см. второе слагаемое в (20)) их непрерывная съемка сопряжена с трудностями, возможности разрешения которых подробно исследовались, в том числе в более ранних работах авторов данной статьи [9].

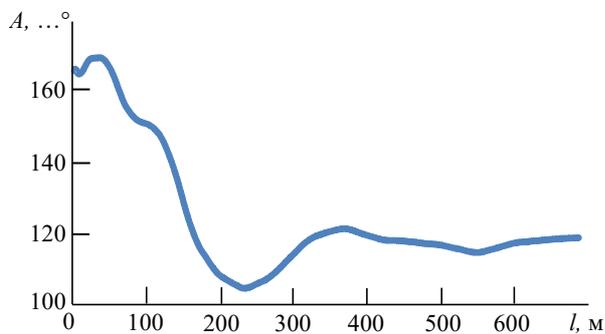


Рис. 6. Угол азимута в зависимости от глубины скважины
 Fig. 6. Azimuth angle relative to borehole depth

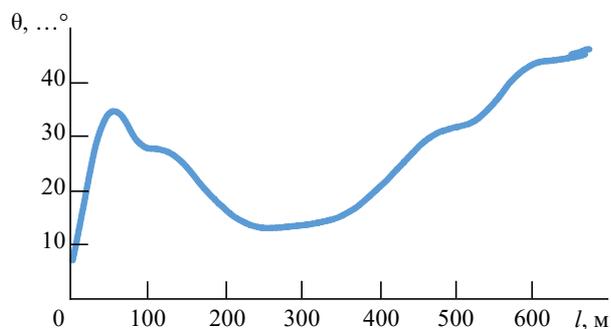


Рис. 7. Зенитный угол в зависимости от глубины скважины
 Fig. 7. Borehole inclination relative to borehole depth

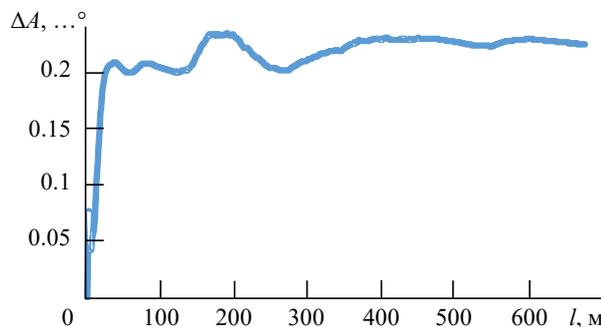


Рис. 8. Погрешность азимута в зависимости от глубины скважины
 Fig. 8. Azimuth error relative to borehole depth

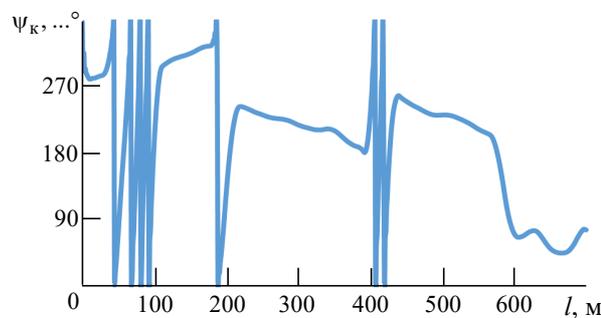


Рис. 9. Угол разворота корпуса СП вокруг продольной оси в зависимости от глубины скважины
 Fig. 9. Inclinator body rotation angle around the longitudinal axis relative to borehole depth

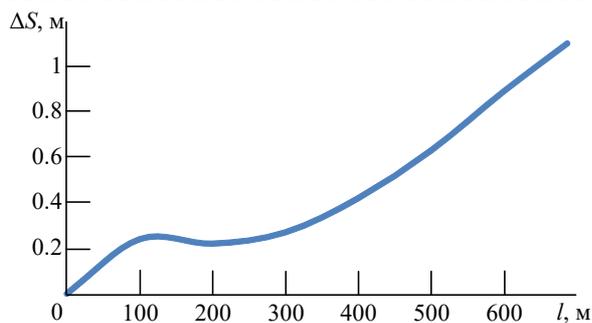


Рис. 10. Погрешность плановых координат в зависимости от глубины скважины

Fig. 10. Plan coordinate error relative to borehole depth

Использование дополнительного грубого широкодиапазонного микромеханического гироскопа для измерения угловой скорости по оси z [23] с комплексированием результатов его и основной схемы [9] – паллиативное решение, реализованное в ГИ УГИ42.03, – следует признать ограниченно эффективным как с точки зрения количественного выигрыша, так и по критерию адаптивности к траектории скважины.

Возможность решительного шага в этом направлении предполагается в развитии одноосного решения ГИ, описанного в данной публикации, но его рассмотрение выходит за ее рамки.

Заключение. В статье развивается подход к созданию инерциальных измерительных модулей (ИИМ) с неполным (< 3) количеством осей измерения углового положения (скорости) для решения задач ориентации и навигации. При этом решение последней подразумевается методом не инерциального, а навигационного счисления координат, базирующимся на параметрах ориентации и внешней относительно ИИМ информации о приращении пути от одометрических и им подобных источников.

Сферой приложения результатов исследования является гироскопическая инклинометрия скважин, где нашли практическое применение современные приборы, обычно построенные на двухосном измерении угловой скорости с помощью ДУС, как правило, роторных с механическим носителем вектора кинетического момента. Побудительными причинами для поиска иных решений является избыточная сложность и относительная дороговизна таких ГИ, а также низкая вибро- и удароустойчивость, особо проявляющаяся при их использовании для ориентирования направления забу-

ривания так называемых вторых стволов из первого вертикального.

В статье предложены схемно-конструктивные и алгоритмические решения по созданию ГИ только с одним ДУС. Авторы рассматривали их и ранее в рабочем порядке (вне публикаций), но, обладая большим опытом работы на рынке сугубо прикладных исследований, перешли к серьезным работам на этом направлении только после появления отличающихся высокой стабильностью КВГ с резонатором индукционного типа, выполненным по MEMS-технологии. При этом была поставлена задача достижения безусловного соответствия нового прибора базовым характеристикам – габаритам (прежде всего, диаметру) и универсальности по признаку типа измерения (точечно-непрерывный), а также той степени адаптивности к траектории скважины, которые свойственны современным двухосным ГИ.

Вновь созданная схема ГИ основана:

- на использовании – впервые при измерениях в непрерывном режиме для удержания ("косвенной, грубой стабилизации") оси единственного ДУС около апсидальной плоскости – поворотной рамки с ДПИ, являющейся базовым конструктивно-техническим решением всех современных ГИ и используемой обычно в режиме точечного компасирования;

- на переходе в режиме точечного компасирования от одновременных измерений взаимно-перпендикулярных проекций горизонтальной составляющей скорости суточного вращения Земли двухосным ДУС к новому алгоритму их одноосных измерений при последовательных поворотах рамки на $n \times 90^\circ$ ($n = 0 \dots 4$) вокруг продольной оси СП. Эти повороты, сопровождаемые фиксацией показаний ДУС, используются в ГИ независимо от количества измерительных осей и составляют суть многопозиционного компасирования – процедуры, позволяющей резко снизить ошибку определения азимута за счет "автокомпенсации" дрейфов ДУС, не зависящих от перегрузки.

Подчеркнем, завершая, что рассмотренная в статье новация позволяет, по сути, реализовать "продольную" (ХУ) схему универсального ГИ на одном одноосном ДУС, одновременно (и существенно) повышая ее надежность и снижая

стоимость. Как уже отмечалось, "степень адаптивности к траектории скважины, свойственная современным двухосным ГИ," остается той же, т. е. ограниченной. В следующей публикации авторы планируют показать, как может быть

развито предложенное техническое решение с целью достижения абсолютной адаптивности к траектории, т. е. независимости точности съемки от ориентации ствола скважины.

Список литературы

1. Jamieson A. Introduction to Wellbore Positioning. Research Office in Inverness, University of the Highlands and Islands, Scotland. 2012. P. 52–81. URL: https://www.uhi.ac.uk/en/t4-media/one-web/university/research/eBook_V9_10_2017-redux.pdf (дата обращения 18.01.23)
2. Eren T., Suicmez V. S. Directional drilling positioning calculations // J. of Natural Gas Science and Engineering. 2020. Vol. 73. P. 103081. doi: 10.1016/j.jngse.2019.103081
3. Codling J. Low Angle Survey Errors // Soc. of Petroleum Engineers, Wellbore Positioning Technical Section 49th General Meeting. Den Haag, Netherlands, 2019. doi: 10.2118/187249-MS
4. Современные информационно-измерительные комплексы подземной навигации и ориентации / Я. И. Биндер, И. Е. Гутнер, А. П. Мезенцев, А. А. Молчанов // Гироскопия и навигация. 2003. № 1 (40). С. 110–123.
5. Морозов О., Овчинников А. Геологическое сопровождение бурения online. Горизонтальные скважины на Приразломном – под контролем // Offshore (Russia). 2015. С. 52–56.
6. Живов П. Н., Оганов А. С. Научно-методические решения по автоматизированному управлению траекторией ствола направленной скважины // Вестн. Ассоциации буровых подрядчиков. 2010. № 3. С. 38–42.
7. Hawkinson B. Gyro Technology in the Oil and Gas Industry // Proc. of the 39th Meeting of Soc. of Petroleum Engineers, Wellbore Positioning Technical Section. Long Beach, California, USA, 9 May 2014.
8. Арсланов И. Г., Ягафарова Х. Н. Особенности применения непрерывных гироскопических инклинометров // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2018. № 5. С. 16–19. doi: 10.30713/1999-6934-2018-5-16-19
9. Об использовании различных схем гироинклинометров для непрерывной съемки скважин произвольной ориентации / Я. И. Биндер, Т. В. Падерина, А. С. Лысенко, А. Н. Федорович // Гироскопия и навигация. 2010. № 4 (71). С. 53–73. doi: 10.1134/s2075108711010020
10. Иконников Ю. А. Боковые стволы – руководство пользователя. О целесообразности регламентирования выполнения работ по резке боковых стволов из ранее пробуренных скважин в ОАО "ЛУКОЙЛ" // Нефтегазовая вертикаль. 2006. № 2. С. 49–52.
11. Варушкин С. В., Хакимова Ж. А. Проектирование геологоразведочных работ методом строительства боковых стволов // Вестн. ПНИПУ. Геология, нефтегазовое и горное дело. 2018. Т. 18, № 1. С. 16–27.
12. Куликов С. В. Капитальный ремонт скважин резкой боковых стволов // Нефть. Газ. Новации. 2011. № 12. С. 71–75.
13. Гилязов Р. М. Бурение нефтяных скважин с боковыми стволами. М.: ООО "Недра Бизнесцентр", 2002. 255 с.
14. Вализада Б. А., Очередько Т. Б. Применение горизонтальных скважин для повышения эффективности разработки месторождений на примере 302–303 залежей Ромашкинского месторождения // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестн.). 2017. № 4. С. 226–249.
15. Оценка перспективности бурения боковых горизонтальных стволов и совершенствования системы разработки на турнейском объекте Черновского месторождения / О. В. Савенок, Д. А. Березовский, Г. В. Кусов, М. Норманн // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестн.). 2018. № 2. С. 123–141.
16. Биндер Я. И. Аналитическое компасирование в инклинометрии скважин малого диаметра // Гироскопия и навигация. 2003. № 2 (41). С. 38–46.
17. Гуськов А. А., Цыбрюева И. В. Метод повышения точности начальной азимутальной ориентации гироскопического инклинометра // Материалы конф. XVIII Туполевские чтения: междунар. молодеж. науч. конф., Казань, 26–28 мая 2010 г. / КГТУ. Казань, 2010. Т. IV. С. 614–616.
18. Скважинный прибор инклинометра / К. О. Барышников, М. И. Коптенков, А. И. Баландин, Е. В. Шаховцев // Лесной вестн. 2015. № 3. С. 50–55.
19. Сысоева С. С. Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения // Компоненты и технологии. 2014. № 6. С. 40–46.
20. Advanced Trajectory Computational Model Improves Calculated Borehole Positioning, Tortuosity and Rugosity / M. F. Abughaban, B. Bialecki, A. W. Eustes, J. P. de Wardt, S. Mullin // Paper presented at the IADC/SPE Drilling Conf. and Exhibition, Fort Worth, Texas, USA, March 2016. doi: 10.2118/178796-MS
21. Автокомпенсация дрейфов ДУС непрерывного гироинклинометра с использованием дискретных модуляционных разворотов / Я. И. Биндер, А. С. Лысенко, Т. В. Падерина, В. Г. Розенцвейн // Сб. материалов XIX Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. 2012. С. 8–15.

22. Лысенко А. С., Елисеенков А. Е. Результаты испытаний малогабаритного гироинклинометра с системой автокомпенсации дрейфов датчика угловой скорости // *Материалы докл. XIV конф. молодых ученых "Навигация и управление движением"*, Санкт-Петербург, 13–16 марта 2012 г. / ЦНИИ "Электроприбор". СПб., 2012. С. 88–94.

23. Биндер Я. И., Падерина Т. В. Бесплатформенные инерциальные измерительные модули: компасирование и калибровка на неподвижном основа-

нии в условиях ограничения угловых перемещений // *Гироскопия и навигация*. 2003. № 4 (43). С. 29–40.

24. Лысенко А. С. Алгоритмы работы и схема построения гироинклинометра с продольной компоновкой для вертикальных участков стволов скважин // *Гироскопия и навигация*. 2016. Т. 24, № 1 (92). С. 72–87. doi: 10.1134/S207510871603010X

25. Исаченко В. Х. *Инклинометрия скважин*. М.: Недра, 1987. С. 5–10.

Информация об авторах

Биндер Яков Исаакович – кандидат технических наук (1988), главный конструктор АО "СКБ ПН". Автор 109 научных работ. Сфера научных интересов: разработка и исследование информационно-навигационных систем в области морской и подземной навигации.

Адрес: АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации", Беловодский пер., д. 9, корп. 2, лит. Ц, Санкт-Петербург, 194044, Россия

E-mail: j459190@yahoo.com

<https://orcid.org/0009-0001-5950-1980>

Хазов Иван Анатольевич – инженер АО "СКБ ПН", аспирант 1-го года обучения кафедры лазерных измерительных и навигационных систем факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов: разработка и исследование информационно-навигационных систем в области морской и подземной навигации; обработка данных.

Адрес: АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации", Беловодский пер., д. 9, корп. 2, лит. Ц, Санкт-Петербург, 194044, Россия

E-mail: IvanHazov@okb3d.com

<https://orcid.org/0009-0006-3770-0133>

References

1. Jamieson A. Introduction to Wellbore Positioning. Research Office in Inverness, University of the Highlands and Islands, Scotland. 2012, pp. 52–81. Available at: https://www.uhi.ac.uk/en/t4-media/one-web/university/research/eBook_V9_10_2017-redux.pdf (accessed 18.01.23)

2. Eren T., Suicmez V. S. Directional drilling positioning calculations, *J. Nat. Gas Sci., Eng.* 73 (2020), p. 103081. doi: 10.1016/j.jngse.2019.103081

3. Codling J. Low Angle Survey Errors. Soc. of Petroleum Engineers, Wellbore Positioning Technical Section 49th General Meeting. Den Haag, Netherlands, 2019. doi: 10.2118/187249-MS

4. Binder Y. I., Gutner I. E., Mezentsev A. P., Molchanov A. A. Present-Day Information-Measuring Systems for Subsurface Navigation and Orientation. *Гироскопия и навигация* [Gyroscope and navigation]. 2003, no.1 (40), pp. 110–123. (In Russ.)

5. Morozov O., Ovchinnikov A. Geological Drilling Support Online. Horizontal Wells at Pribrazlomnoye are under Control. Offshore. 2015, pp. 52–56. (In Russ.)

6. Zhivov P. N., Oganov A. S. Scientific and Methodological Solutions for Automated Control of the Trajectory of a Directional Wellbore. *Bulletin of the Association of Drilling Contractors*. 2010, no. 3, pp. 38–42. (In Russ.)

7. Hawkinson B. Gyro Technology in the Oil and

Gas Industry. Proc. of the 39th Meeting of Soc. of Petroleum Engineers, Wellbore Positioning Technical Section. Long Beach, California, USA, 9 may 2014.

8. Arslanov I. G., Yagafarova Kh. N. Specific Features of Use of Continuous Gyroscopic Incliner. Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex. 2018, no. 5, pp. 16–19. doi: 10.30713/1999-6934-2018-5-16-19 (In Russ.)

9. Binder Y. I., Lysenko A. S., Paderina T. V., Fedorovich A. N. Various Schemes for Continuous Gyro-Inclinometric Survey of Arbitrarily Oriented Wellbores. *Gyroscope and Navigation*. 2010, no. 4 (71), pp. 53–73. doi: 10.1134/s2075108711010020 (In Russ.)

10. Ikonnikov Ju. A. Side Barrels – User Manual. on the Expediency of Regulating the Performance of Work on Sidetracking from Previously Drilled Wells in JSC "LUKOIL". *Oil and Gas Vertical*. 2006, no. 2, pp. 49–52. (In Russ.)

11. Varushkin S. V., Hakimova Zh. A. The Design of Geological Exploration with Side Track Drilling. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University*. 2018, no. 1 (18), pp. 16–27. (In Russ.)

12. Kulikov S. V. *Kapitalnyy remont skvazhin zarezkoj bokovykh stvolov* [Well Workover with Sidetracking]. *Neft. Gaz. Novatsii*. 2011, no.12, pp. 71–75. (In Russ.)

13. Giljazov R. M. Drilling Oil Wells with Lateral

Boreholes. *Nedra Biznes Tsentr* [Nedra Business Center]. 2002, 255 p. (In Russ.)

14. Valizada B. A., Ochered'ko T. B. Application of Horizontal Wells to Increase the Efficiency of Field Development by the Example of Deposits 302–303 of the Romashkinskoye Field. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*. 2017, no. 4, pp. 226–249. (In Russ.)

15. Savenok O. V., Berezovskiy D. A., Kusov G. V., Norman M. Estimation of the Perspectiveness of Drilling of Side Horizontal Steels and Improvement of the Development System at the Turney Object of the Chernovskoye Field. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*. 2018, no. 2, pp. 123–141. (In Russ.)

16. Binder Y. I. Analytical Compassing in Slim Hole Inclinometry. *Girokopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation]. 2003, no. 2 (41), pp. 38–46. (In Russ.)

17. Gus'kov A. A., Cybrjaeva I. V. *Metod povysheniya tochnosti nachal'noj azimutal'noj orientacii girokopicheskogo inklinometra* [Method for Improving the Accuracy of the Initial Azimuth Orientation of a Gyroscopic Inclinometer]. Proc. of the XVIII Tupolev Readings: Intern. Youth Scientific Conf., Kazan, 26–28 May 2010. Kazan State Technical University. 2010, pp. 614–616. (In Russ.)

18. Baryshnikov K. O., Koptenkov M. I., Balandin A. I., Shahovtsev E. V. The Device for the Well to the Inclinometers. *Forestry Bulletin*. 2015, no. 3, pp. 50–55. (In Russ.)

19. Sysoyeva S. S. Market trends for high-end MEMS inertia sensors. New Levels of Performance and Performance. *Komponenty i Tekhnologii* [Components & Technologies]. 2014, no. 6, pp. 40–46. (In Russ.)

20. Abughaban M. F., Bialecki B., Eustes A. W., de Wardt J. P., Mullin S. Advanced Trajectory Computational Model Improves Calculated Borehole Positioning, Tortuosity and Rugosity. Paper presented at the IADC/SPE Drilling Conf. and Exhibition, Fort Worth, Texas, USA, March 2016. doi: 10.2118/178796-MS

21. Binder Y. I., Lysenko A. S., Paderina T. V., Rozentsvejn V. G. *Avtokompensacija drejfov DUS nepreryvnogo giroinklinometra s ispol'zovaniem diskretnyh moduljacionnyh razvorotov* [Auto-Compensation of the ARS Drifts of a Continuous Gyroinclinometer Using Discrete Modulation Turns]. Proc. of the XIX Saint Petersburg Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, 28–30 May 2012, pp. 8–15. (In Russ.)

22. Lysenko A. S., Eliseenkov A. E. *Rezultaty ispytaniy malogabaritnogo giroinklinometra s sistemoi avtokompensatsii drejfov datchika uglovoi skorosti* [Test Results of a Small-Sized Gyroinclinometer with an Auto-Compensation System for the Angular Velocity Sensor Drifts]. Proc. of the 14th Conf. of Young Scientists "Navigation and Motion Control", Saint Petersburg, 13–16 March 2012. Concern CSRI Elektropribor, 2012, pp. 88–94. (In Russ.)

23. Binder Y. I., Paderina T. V. Strapdown Inertial Measuring Units: Compassing and Calibration under Restriction of Angular Movements. *Girokopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation]. 2003, no. 4 (43), pp. 29–40. (In Russ.)

24. Lysenko A. S. Algorithms and Design of Longitudinal Gyroinclinometer for Vertical Parts of Wellbores. *Girokopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation]. 2016, no. 7, pp. 253–263. doi: 10.1134/S207510871603010X

25. Isachenko V. Kh. *Inklinometriya skvazhin* [Well Inclinometry]. Moscow, Nedra, 1987, pp. 5–10. (In Russ.)

Information about the authors

Yakov I. Binder, Cand. Sci. (1988), Chief designer of Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation. The author of 109 scientific publications. Area of expertise: development and research of information and navigation systems in the field of marine and underground navigation.

Adress: "Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation" JSC, 9/2, Belovodskii per., St Petersburg 194044, Russia

E-mail: j459190@yahoo.com

<https://orcid.org/0009-0001-5950-1980>

Ivan A. Khazov, engineer of Special design bureau of devices of underground navigation, Postgraduate student of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: development and research of information and navigation systems in the field of underground navigation; data processing.

Adress: "Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation" JSC, 9/2, Belovodskii per., St Petersburg 194044, Russia

E-mail: IvanHazov@okb3d.com

<https://orcid.org/0009-0006-3770-0133>

Экспериментальное сравнение интерференционного и автоколлимационного нуль-индикаторов

Б. Ньямверу¹✉, Е. В. Шишалова²

¹Колледж бизнес-образования СВЕ, Дар-эс-Салам, Танзания

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ bonifacenyamweru23@gmail.com

Аннотация

Введение. В настоящее время во многих научных и промышленных задачах требуется измерение углов с высокой точностью. Одним из самых распространенных высокоточных углоизмерительных приборов является гониометр, в составе которого могут применяться различные типы нуль-индикаторов (НИ). НИ, в свою очередь, имеют различные принципы работы и по-разному воспринимают некоторые факторы, способные вносить вклад в погрешность измерений.

Цель работы. Экспериментальное сравнение двух типов НИ: интерференционного с призмой Кестерса и автоколлимационного на базе квадрантного фотодиода.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели была собрана экспериментальная установка, включающая два НИ, которые могут подключаться к одному гониометру и измерять накопленные углы одной многогранной призмы в одинаковых условиях.

Результаты. В результате измерений и проведенной процедуры кросс-калибровки были получены 4 набора данных. Анализ обработанных данных показал, что разница погрешностей кольцевого лазера при использовании двух НИ не превысила 0.06", что находится в пределах случайной погрешности. В то же время, разница между отклонениями отражающих граней от номинального положения для двух граней этот предел превысила, что подтверждает влияние отклонения поверхности от плоскости на угловые измерения с разными типами НИ.

Заключение. По результатам эксперимента с точки зрения случайной погрешности интерференционный НИ проявил себя лучше, продемонстрировав СКО измеренных значений 0.02" при измерениях в ходе 25 оборотов призмы. В то же время автоколлимационный НИ имел СКО на уровне 0.04" при измерениях в течение 64 оборотов. Предположительно это может быть связано с установкой НИ. Также необходимо отметить, что корреляция между статистическими характеристиками самой отражающей грани и разницей между ее отклонениями, определяемыми разными типами НИ, отсутствует.

Ключевые слова: динамический гониометр, интерференционный нуль-индикатор, автоколлимационный нуль-индикатор, многогранная призма, систематическая погрешность, случайная погрешность

Для цитирования: Ньямверу Б., Шишалова Е. В. Экспериментальное сравнение интерференционного и автоколлимационного нуль-индикаторов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 149–158. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-149-158

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.06.2023; принята к публикации после рецензирования 13.07.2023; опубликована онлайн 28.09.2023



Experimental Comparison of Interference and Autocollimating Null Indicators

Boniface Nyamweru^{1✉}, Elizaveta V. Shishalova²

¹College of Business Education (CBE), Dar es Salaam, Tanzania

²Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ bonifacenyamweru23@gmail.com

Abstract

Introduction. At present, measurement of angles with high accuracy is an essential task in various scientific and industrial fields. The goniometer is one of the most widespread high-precision angle measuring devices, which can incorporate various types of null indicators. In turn, null indicators (NI) are based on different operating principles and can be sensitive to external factors that contribute to the measurement error.

Aim. Experimental comparison of two NI types: an interference NI with a Koester prism and an autocollimating NI based on a quadrant photodiode.

Materials and methods. An experimental setup was assembled, including two NI that could be connected to one goniometer and measure the accumulated angles of one optical polygon under the same conditions.

Results. As a result of conducting measurements and performing a cross-calibration procedure, four sets of data were obtained. An analysis of the processed data showed that the difference in the errors of the ring laser when using two NI did not exceed 0.06 arc seconds, being within the margin of random error. At the same time, the difference between the deviations of the reflecting faces from the nominal position for the two faces exceeded this limit, which confirms the effect of deviation of the surface from the plane on angular measurements with different types of null indicators.

Conclusion. According to the results obtained, from the random error point of view, the interference null indicator NI showed higher performance, demonstrating the RMS of measured values of 0.02 angular seconds when measured during 25 prism revolutions. At the same time, the autocollimating null indicator NI had an RMS at the level of 0.04 angular seconds when measured during 64 revolutions. Presumably, this may be caused by the installation specifics of NI. It should also be noted that there is no correlation between the statistical characteristics of the reflecting face itself and the difference between its deviations determined by different NI types.

Keywords: dynamic goniometer, interference null indicator, autocollimating null indicator, optical polygon, systematic error, random error

For citation: Nyamweru B., Shishalova E. V. Experimental Comparison of Interference and Autocollimating Null Indicators. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 149–158. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-149-158

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 01.06.2023; accepted 13.07.2023; published online 28.09.2023

Введение. Во многих областях науки и техники требуется измерение углов с высокой точностью. Одним из самых распространенных приборов для высокоточного измерения углов является гониометр. Гониометр – это прибор, предназначенный для измерения углов между отражающими свет гранями различных деталей, а также для измерения углов отклонения световых лучей. В области метрологии гониометры часто используются для проверки многогранных призм (МП) и других оптических деталей [1].

В общем случае гониометры делятся на

статические и динамические, в состав последних чаще всего входит кольцевой лазер (КЛ) и для измерений используется нуль-индикатор (НИ) [2–4]. Основное отличие динамического гониометра заключается в том, что при измерениях с его помощью измеряемый объект (ИО) непрерывно вращается. В качестве ИО в работе выступает МП [5].

НИ – это устройство, которое задает опорное направление в пространстве и регистрирует тот момент, когда отражающая грань ИО становится перпендикулярной оптической оси

(опорному направлению) НИ, в дальнейшем будем называть этот момент искомым [6]. КЛ в составе гониометра служит некой эталонной угловой шкалой, имеющей высокую точность.

Одним из самых первых НИ возник автоколлимационный НИ (АНИ) с пороговой схемой регистрации сигнала. Пороговая схема регистрации предполагает выработку логического импульса на выходе НИ в тот момент, когда значение аналогового сигнала на фотоприемнике превышает некоторый заданный уровень. Схема такого устройства довольно проста, однако точность во многих задачах недостаточна из-за большой ширины аналогового сигнала квазитрехугольной формы, по которому с помощью пороговой схемы определяется искомым момент.

Вышеупомянутого недостатка лишен интерференционный НИ (ИНИ), выходной сигнал которого имеет широкий пьедестал и узкий импульс, максимум которого соответствует искомому моменту. Малая ширина интерференционного импульса позволяет более точно определять момент совпадения оси НИ и нормали к отражающей поверхности ИО. Однако на точность результатов негативно влияют неровности поверхности объекта, неоднородность среды и другие факторы, из-за которых размывается интерференционная картина [7, 8].

НИ, который имеет высокую точность и не так чувствителен к качеству отражающей поверхности, является НИ с цифровой обработкой сигнала. Способ обработки сигнала такого устройства основан на оценке центра масс аналогового сигнала НИ, что определяет более высокую точность измерений по сравнению с АНИ с пороговой схемой регистрации. Точность такого способа ограничена в основном нестабильностью скорости вращения объекта, отношением сигнал/шум и частотой дискретизации сигнала. Также среди недостатков такого НИ можно выделить сложность обработки сигнала [9].

Нельзя не отметить особенности АНИ с дифференциальной схемой регистрации, который построен на базе квадрантного фотодиода. В отличие от ранее рассмотренных типов НИ искомым момент в данном случае определяется не по одному сигналу, а по точке пересечения двух сигналов, что положительно сказывается на точности при-

бора и степени ее зависимости от различных факторов, способных исказить сигнал [10].

При высокоточных измерениях углов качество отражающих поверхностей исследуемого объекта может влиять не только на точность измерений, проведенных с помощью ИНИ, но также и на точность измерений, проведенных с помощью АНИ [11, 12]. Целью данной работы является оценка степени соответствия измерений, проведенных с различными типами НИ в одинаковых условиях.

Нуль-индикаторы. Для сравнения степени влияния качества отражающих поверхностей ИО в работе используются ИНИ и АНИ с дифференциальной схемой регистрации сигнала.

Оптическая схема ИНИ представлена на рис. 1. Излучение светодиода 1 отражается от зеркала 3 и попадает на объектив 4, который формирует параллельный пучок света. Свет после прохождения диафрагмы 5 падает на входную грань призмы Кестерса 6. На выходе призмы формируется два параллельных пучка света I и II. При отражении от контролируемой поверхности 7 между ними появляется сдвиг фаз, определяемый углом поворота α . Два луча проходят через призму в обратном направлении, совмещаются на светоделительном покрытии и интерферируют. Интерференционная картина проходит через объектив 8, отражается зеркалом 9 и проецируется на фотодиод 2.

При повороте контролируемой поверхности изменяется угловое рассогласование пучков I и II и интерференционное поле на входе НИ ме-

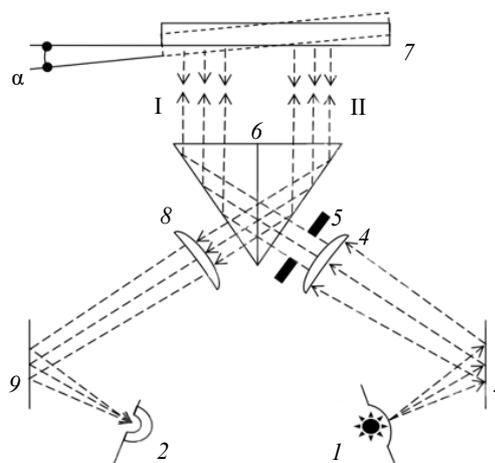


Рис. 1. Оптическая схема интерференционного НИ
Fig. 1. Optical scheme of an interference NI

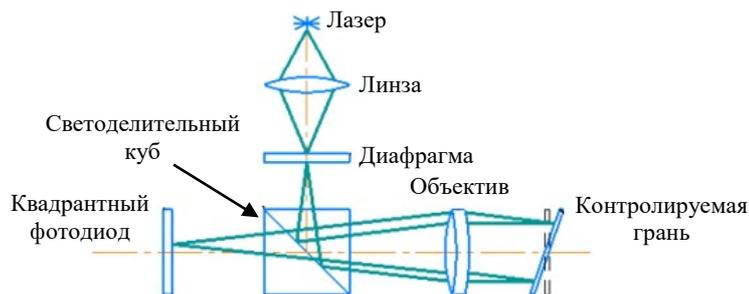


Рис. 2. Оптическая схема автоколлимационного НИ

Fig. 2. Optical scheme of an autocollimating NI

няется. Когда нормаль к отражающей поверхности совпадает с направлением падающих световых пучков, их волновые фронты совмещаются и на выходе НИ наблюдается максимальный выходной сигнал.

При наличии неровностей на отражающей поверхности пучки I и II будут рассеиваться на этих неровностях, и интерференционная картина будет отличаться от идеальной, что приведет к потере точности прибора.

Оптическая схема АНИ представлена на рис. 2. Излучение лазера проходит через собирающую линзу и попадает на круглую диафрагму. Далее лучи через светоделительный куб и объектив попадают на отражающую поверхность ИО. Изображение щели, отраженное от грани, проецируется на квадрантный фотодиод.

Процесс формирования сигнала АНИ представлен на рис. 3. Изображение щели I попадает на левые площадки фотодиода, и с них начинают поступать сигналы, которые суммируются. При повороте ИО полученный суммарный сигнал начинает увеличиваться до

тех пор, пока изображение не окажется полностью на площадке фотодиода. По мере прохождения изображения дальше вдоль фокальной плоскости сигнал резко уменьшается и, еще до того момента, пока он не упал до нуля, начинает появляться сигнал с правых площадок. По точке пересечения сигналов 3 на выходе НИ формируется логический импульс 4, который поступает в гониометр для дальнейшей обработки.

Неровности на отражающих гранях приведут к перераспределению интенсивности изображения I, из-за чего сигналы 3 будут иметь искаженную форму, и точка пересечения этих сигналов сместится. Вследствие смещения точки пересечения сигналов логический импульс 4 будет формироваться либо раньше, либо позже искомого момента.

Планирование эксперимента. Для эксперимента будет использоваться лазерный динамический гониометр на базе КЛ КМ-11 [13], на котором штатно установлен ИНИ с призмой Кестерса. В роли АНИ с дифференциальной схемой регистрации выступает АНИ на базе квадрантного фотодиода, он является автономным устройством, однако может подключаться к блоку электроники гониометра вместо встроенного НИ.

Чтобы добиться идентичности условий измерений, необходимо их проводить последовательно и при неизменности расположения всех основных и вспомогательных элементов, входящих в состав экспериментальной установки. Все элементы установки не меняют своего пространственного расположения на протяжении всего эксперимента, при этом переключение между НИ осуществляется механически путем переключения выходных проводов НИ к электронному блоку гониометра.

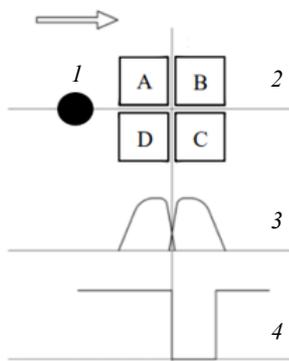


Рис. 3. Формирование выходного сигнала автоколлимационного НИ

Fig. 3. Generation of the autocollimating NI output signal

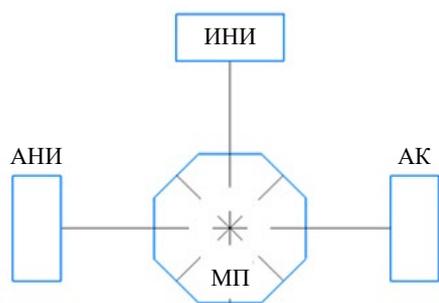


Рис. 4. Вид сверху
Fig. 4. View from above

НИ расположены под углом 90° относительно оси вращения МП, наклон которой юстируется с помощью визуального автоколлиматора (АК). АНИ предварительно прошел процедуру выставки вокруг собственной оптической оси [14]. Расположение этих элементов показано на рис. 4.

Для того чтобы выделить именно те отклонения, которые связаны с применением конкретного типа НИ, необходимо провести кросс-калибровку. Эта процедура позволяет разделить отклонения каждой из граней призмы от номинального положения и отклонения шкалы КЛ в точках расположения граней призмы от номинального положения [15].

В результате проведения измерений и последующей процедуры кросс-калибровки должны быть получены 4 набора данных. Два из них представляют собой отклонения граней призмы от номинального положения, причем различие между ними будет обусловлено только разницей между типами использовавшихся НИ, а другие два – это погрешности КЛ, также относящиеся к измерениям с разными типами НИ. Так как КЛ в измерениях был один и тот же, в теории эти значения должны быть идентичны. На практике они могут различаться, но не более чем на величину, определяемую уровнем случайной погрешности измерений. По степени соответствия между этими значениями можно будет судить об успешности проведенного эксперимента.

Эксперимент. Экспериментальная установка представлена на рис. 5. АНИ 1 направлен на МП 3, на которую также направлен ИНИ 2 под углом 90° относительно автоколлимационного. Оба НИ подключаются к блоку электроники 6 гониометра 5.

В начале эксперимента пузырьковым уровнем ось вращения выставлялась параллельно гравитационной вертикали, чтобы проекция скорости вращения Земли на ось чувствитель-

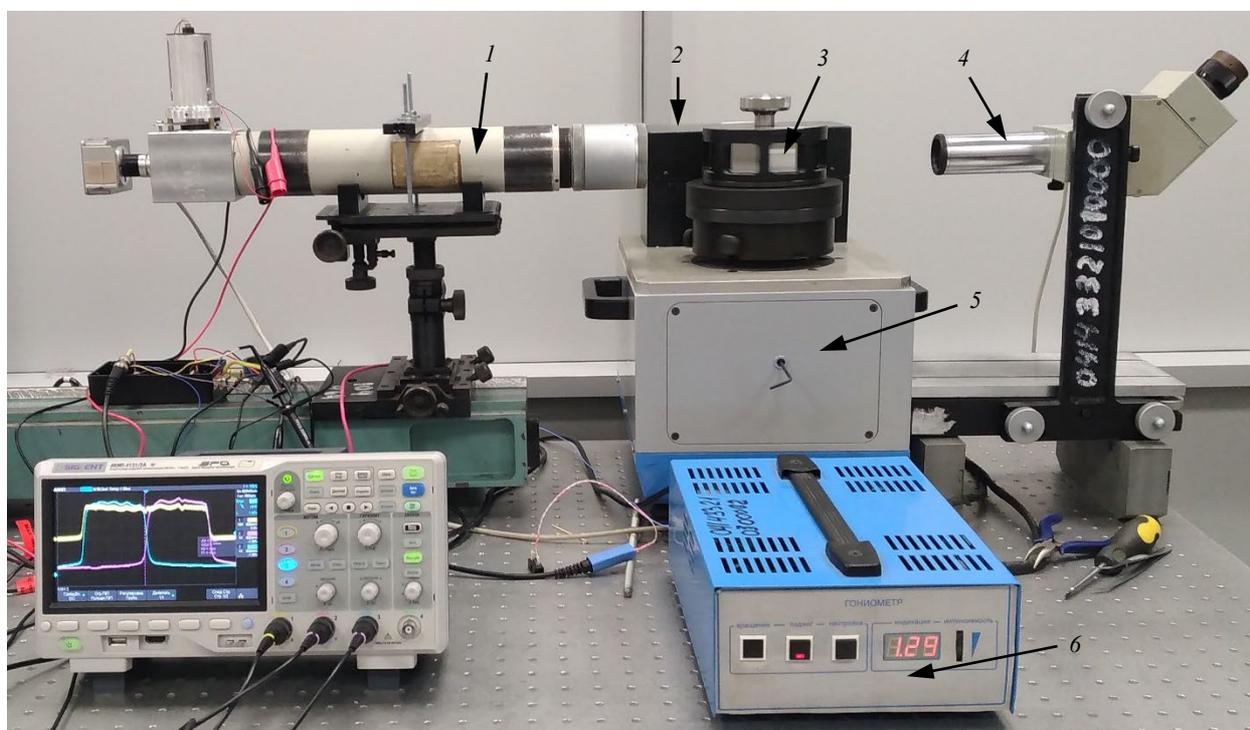


Рис. 5. Экспериментальная установка

Fig. 5. Experimental setup

ности КЛ была постоянной. Затем с помощью стрелочного индикатора таким образом выставлялся эксцентриситет установки МП на поворотный стол, чтобы он составлял менее 5 мкм, а с помощью визуального АК 4 наклон призмы относительно оси вращения выставлялся таким образом, чтобы он не превышал 30".

Измерения проводились при 64 и 25 оборотах призмы с АНИ и ИНИ соответственно, случайная погрешность измерений составляла 0.02" для ИНИ и 0.04" для АНИ. В качестве измеряемого объекта выступала восьмигранная призма, являющаяся образцовой угловой мерой с калибровочным сертификатом, выданным ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Результатами измерений для каждого из НИ являются 8 наборов накопленных углов призмы (измеренных относительно первой грани), при этом каждый новый набор получался при последовательном повороте призмы относительно шкалы КЛ на 45°.

В табл. 1 и 2 представлены отклонения измеренных от номинальных углов призмы для

двух типов НИ. Под номером подразумевается номер смещения.

В результате обработки измеренных значений были получены четыре набора отклонений: граней призмы и шкалы КЛ, относящихся к двум типам НИ. Отклонения представлены на рис. 6 и 7.

В теории систематическая погрешность КЛ не должна различаться для двух НИ, так как гониометр для измерений используется один и тот же. Причина, по которой значения на графике неодинаковы, может быть связана со случайной погрешностью.

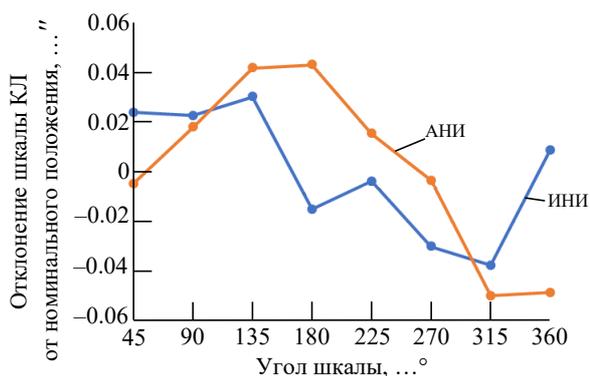


Рис. 6. Погрешность шкалы КЛ
 Fig. 6. Ring laser scale deviation

Табл. 1. Отклонения измеренных углов от номинальных для АНИ

Tab. 1. Nominal angles deviation measured by the ANI

Отклонения от номинальных углов, ..."								
Угол/номер	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0.09	0.11	-0.68	0.03	3.59	-1.48	0.44	-1.57
2	-1.66	-0.09	-0.56	-0.64	3.65	2.11	-1.06	-1.22
3	-1.3	-1.68	-0.72	-0.58	2.98	2.21	2.54	-2.73
4	-2.76	-1.29	-2.36	-0.75	3	1.45	2.61	0.83
5	0.69	-2.82	-1.99	-2.37	2.82	1.45	1.82	0.91
6	0.72	0.72	-3.51	-2.05	1.2	1.27	1.85	0.16
7	0	0.67	-0.03	-3.62	1.52	-0.32	1.61	0.16
8	0	0	0	0	0	0	0	0

Табл. 2. Отклонения измеренных углов от номинальных для ИНИ

Tab. 2. Nominal angles deviation measured by the INI

Отклонения от номинальных углов, ..."								
Угол/номер	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0.12	0.19	-0.81	0.1	3.54	-1.59	0.48	-1.67
2	-1.8	0.03	-0.65	-0.78	3.65	1.94	-1.03	-1.25
3	-1.36	-1.63	-0.82	-0.59	2.81	2.05	2.5	-2.79
4	-2.93	-1.23	-2.52	-0.8	2.92	1.2	2.49	0.68
5	0.64	-2.79	-2.07	-2.43	2.74	1.36	1.72	0.73
6	0.63	0.72	-3.65	-2	1.11	1.13	1.82	-0.07
7	-0.2	0.78	-0.12	-3.59	1.55	-0.48	1.59	0.1
8	0	0	0	0	0	0	0	0

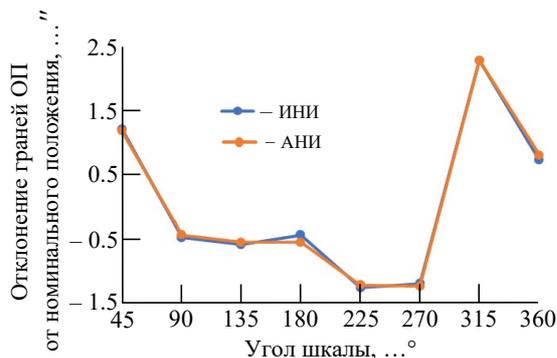


Рис. 7. Отклонения граней призмы от номинального положения

Fig. 7. Polygon faces deviation from nominal position

Так как случайная погрешность ИНИ равна $0.02''$, а АНИ – $0.04''$, разница между погрешностями КЛ для двух НИ не должна превышать суммарную случайную погрешность $0.06''$, иначе эксперимент нельзя считать успешным.

На рис. 7 представлены отклонения граней призмы от номинального положения, измеренные с помощью разных НИ.

Как отмечалось ранее, кросс-калибровка позволяет разделить погрешности КЛ и МП для АНИ и ИНИ. Систематическая погрешность МП для обоих НИ имеет схожий характер во всех углах призмы, как показано на рис. 6.

На рис. 8 представлены различия отклонений граней МП и шкалы КЛ для двух НИ.

Результаты вычислений показывают, что различие погрешностей КЛ для двух типов НИ находится в пределах $0.06''$, что находится в пределах суммарной случайной погрешности измерений. Это говорит о том, что результаты эксперимента можно считать достоверными. Различие отклонений граней призмы, обусловленное применением разных типов НИ, находится в пределах $0.05''$ за исключением 4-й и 8-й граней. Для этих граней различие отклонений превышает установленный уровень случайной погрешности в $0.06''$ и является именно следствием того, что два используемых НИ (АНИ и ИНИ) по-разному воспринимают неидеально плоские грани.

На восьмигранную призму, принимавшую участие в эксперименте, помимо калибровочного сертификата имелась также информация о качестве отражающих граней в виде значений среднеквадратического отклонения (СКО) и размаха отклонений точек поверхности (рис. 9).

Экспериментальное сравнение интерференционного и автоколлимационного нуль-индикаторов
Experimental Comparison of Interference and Autocollimating Null Indicators

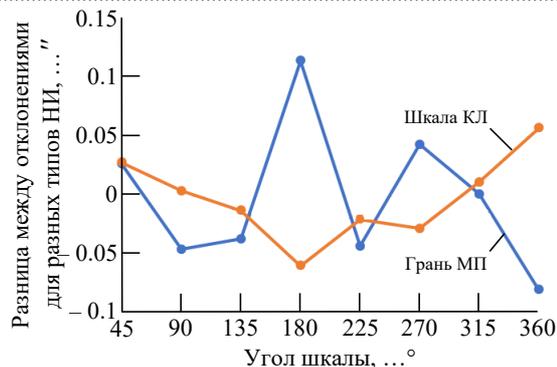


Рис. 8. Различия отклонений граней МП и шкалы КЛ

Fig. 8. Difference between deviations of polygon faces and ring laser scale

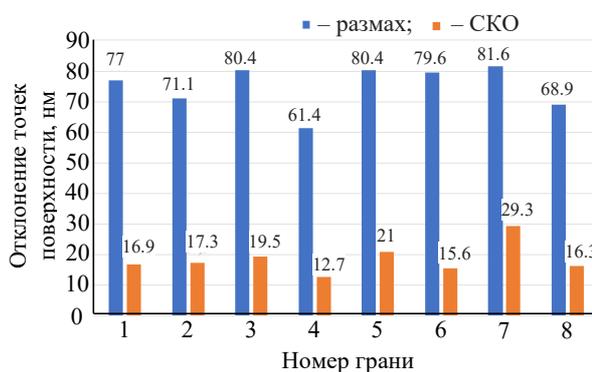


Рис. 9. Отклонение точек отражающих граней призмы

Fig. 9. Reflecting face points deviation

Как видно из рис. 9, грани призмы № 4 и 8 с точки зрения статистических параметров качества поверхности в чем-то даже превосходят остальные – имеют самые низкие значения размаха точек относительно средней плоскости и одни из самых низких значений СКО. Логичным было бы предположить, что чем меньше СКО и разброс точек поверхности, тем она более плоская и тем более схожим должно быть восприятие такой поверхности разными НИ. Но результаты, приведенные на рис. 8, говорят о том, что такое предположение неверно. Отсюда можно сделать вывод, что СКО и разброс отклонений точек поверхности не могут являться объективными критериями оценки отражающей поверхности, участвующей в угловых измерениях.

Заключение. В статье представлено экспериментальное исследование соответствия угловых измерений, проводимых с помощью разных типов НИ – АНИ и ИНИ. В идентичных условиях были проведены измерения отклонений граней восьмигранной призмы от их номи-

нального значения. Для исключения систематической погрешности КЛ, представляющего собой шкалу экспериментальной гониометрической установки, была также проведена процедура кросс-калибровки.

По результатам эксперимента с точки зрения случайной погрешности ИНИ проявил себя лучше, продемонстрировав СКО измеренных значений 0.02" при измерениях в ходе 25 оборотов призмы. В то же время АНИ имел СКО на уровне 0.04" при измерениях в течение 64 оборотов. Предположительно, это может быть связано с тем, что ИНИ был установлен на корпусе самого гониометра, а АНИ – на опоре рядом с гониометром. Данное конструктивное решение было обусловлено возможностями лаборатории. Незначительные вибрации, передающиеся через оптический стол, могли спровоцировать увеличение случайной погрешности измерений, но на систематическую погрешность и, соответственно, идентичность условий измерений они не влияют.

Анализируя полученные систематические отклонения, можно сделать несколько выводов. Во-первых, эксперимент прошел удачно, так как различие между отклонениями шкалы гониометра, полученными в результате кросс-калибровок с разными типами НИ, не превысило порога в 0.06", задаваемого уровнем случайной погрешности. Во-вторых, выбор типа НИ совместно с неидеальностью отражающих поверхностей граней призмы влияет на результат угловых измерений, проводимых на динамическом гониометре, так как для некоторых граней разница между их отклонениями превысила порог случайной погрешности. Также необходимо отметить, что корреляция между статистическими характеристиками самой отражающей грани и разницей между ее откло-

нениями, определяемыми разными типами НИ, отсутствует. Необходимо искать другие характеристики отражающей поверхности, которые помогли бы спрогнозировать сходимость результатов угловых измерений, проводимых с помощью разных НИ.

Необходимо отметить, что обозначение влияния "типа" НИ в некоторой степени является условным. На самом деле приведенные результаты демонстрируют, что влияние оказывает неплоскостность поверхности и метод определения нормали к этой неплоской поверхности, реализованный в НИ. Очевидно, что методы, реализованные в НИ, построенных на применении разных оптических явлений – интерференции и автоколлимации, будут различаться наиболее ощутимо. Именно поэтому они были выбраны для проведения эксперимента – для обеспечения его репрезентативности. Хотя это не исключает того, что восприятие одной и той же неплоской поверхности может отличаться у разных модификаций НИ одного типа или даже у одинаковых моделей НИ со специфическими дефектами.

Наибольшую значимость полученные результаты представляют для метрологической задачи передачи единицы плоского угла с помощью образцовых угловых мер – МП и клиньев. Как правило, призмы калибруются с помощью эталонных измерительных средств, получают калибровочный паспорт и далее используются для оценки точности углоизмерительных средств более низкого уровня. Результаты, представленные в статье, показывают, что при сопоставлении углоизмерительных средств с помощью МП с точностями выше 0.1", необходимо также учитывать, какими средствами регистрируются отражающие грани призмы в этих средствах.

Список литературы

1. Иванов П. А. Автоколлиматоры и гониометры. Обзор современных моделей // Фотоника. 2018. Т. 12, № 1 (69). С. 66–74. doi: 10.22184/1993-7296.2018.69.1.66.74
2. Filatov Yu. V., Loukianov D. P., Probst R. Dynamic angle measurement by means of a ring laser // Metrologia. 1997. Vol. 34, № 4. P. 343–351. doi: 10.1088/0026-1394/34/4/7
3. Бачиш Е. А., Павлов П. А. Исследование метрологических характеристик лазерного динамиче-

ского гониометра // Измерительная техника. 2009. № 5. С. 19–23.

4. Precision angle measurement systems on the basis of ring laser gyro / Yu. V. Filatov, P. A. Pavlov, A. A. Velikoseltsev, K. U. Schreiber // Sensors. 2020. Vol. 20, № 23. P. 1–14. doi: 10.3390/s20236930

5. Павлов П. А., Филатов Ю. В. Результаты калибровки многогранных призм с помощью лазерного гониометра ИУП-1Л // Изв. ГЭТУ. 1997. Вып. 509. С. 41.

6. Оптические нуль-индикаторы для гониометрических систем: обзор / В. Ю. Венедиктов, Б. Ньямверу, Р. А. Ларичев, Ю. В. Филатов, Е. В. Шишалова // Фотоника. 2022. Т. 16, № 6. С. 464–475. doi: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.6.464.474

7. Павлов П. А. Анализ погрешности углового интерференционного нуль-индикатора // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2008. № 4. С. 55–62.

8. Филатов Ю. В. Анализ работы интерференционного углового нуль-индикатора // Опт.-мех. промышленность. 1989. № 4. С. 13–17.

9. Pavlov P. A., Larichev R. A., Filatov Yu. V. Digital autocollimating null-indicator for dynamic goniometry // Optical Engineering. 2020. Vol. 59, № 10. P. 104103. doi: 10.1117/1.OE.59.10.104103

10. Ларичев Р. А., Филатов Ю. В. Автоколлимационный нуль-индикатор: разработка и применение в динамической гониометрии // Опт. журн. 2013. Т. 80, № 9. С. 39–44.

11. Ларичев Р. А., Филатов Ю. В. Влияние топографии отражающей поверхности на угловые измерения с использованием автоколлиматора // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2012. № 7. С. 90–96.

12. Filatov Yu. V., Larichev R. A. Aberration influence on accuracy of angle measurements by means of autocollimator // Proc. of SPIE – The Intern. Society for Optical Engineering. Munich, Germany, 22–25 June 2015. P. 95253O. doi: 10.1117/12.2184726

13. Павлов П. А. Анализ алгоритмов измерений лазерным динамическим гониометром // Измерительная техника. 2008. № 1. С. 17–20.

14. Study of adjustment influence on the autocollimating null-indicator accuracy / Yu. V. Filatov, M. S. Nikolaev, R. A. Larichev, P. A. Pavlov // Proc. of SPIE – The Intern. Society for Optical Engineering. 11–16 Oct. 2020. P. 115520H. doi: 10.1117/12.2573769

15. Павлов П. А. Особенности метода кросскалибровки в лазерной гониометрии // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 21–24.

Информация об авторах

Ньямверу Бонифаций – ассистент преподавателя Департамента правовой и промышленной метрологии Колледжа бизнес-образования СВЕ. Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – оптические метрологические системы.

Адрес: Колледж бизнес-образования СВЕ, ул. Биби-Тити-Мохаммед, Дар-эс-Салам, 1968, Танзания
E-mail: bonifacenyamweru23@gmail.com

Шишалова Елизавета Викторовна – магистрант кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – высокоточные угловые измерения.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: lizabelaya.00@mail.ru

References

1. Ivanov P. A. Autocollimators and Goniometers. Review of Modern Models. Photonics Russia. 2018, vol. 12, no. 1(69), pp. 66–74. doi: 10.22184/1993-7296.2018.69.1.66.74 (In Russ.)

2. Filatov Yu. V., Loukianov D. P., Probst R. Dynamic Angle Measurement by Means of a Ring Laser. Metrologia. 1997, vol. 34, no. 4, pp. 343–351. doi: 10.1088/0026-1394/34/4/7

3. Bachish E. A., Pavlov P. A. Laser Dynamic Goniometer Metrological Characteristics. Measurement Techniques. 2009, vol. 52, no. 5, pp. 465–471. doi: 10.1007/s11018-009-9305-4

4. Filatov Yu. V., Pavlov P. A., Velikoseltsev A. A., Ulrich Schreiber K. Precision Angle Measurement Systems on the Basis of Ring Laser Gyro. Sensors. 2020, vol. 20, no. 23, pp. 1–14. doi: 10.3390/s20236930

5. Pavlov P. A., Filatov Yu. V. *Rezultaty kalibrovki mnogogrannykh prizm s pomoshch'yu lazernogo goniometra IUP-1L* [Calibration Results for Polyhedral Prisms Using the IUP-1L Laser Goniometer]. *Izvestiya SPbGETU LETI*. 1997, vol. 509, p. 41. (In Russ.)

6. Venedictov V. Yu., Nyamweru B., Larichev R. A., Filatov Yu. V., Shishalova E. V. Optical null-indicators

for goniometric systems: a review. Photonics Russia. 2022, vol. 16, no. 6, pp. 464–475. doi: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.6.464.474 (In Russ.)

7. Pavlov P. A. The Error Analysis of an Angular Interference Null-Indicator. *Izvestiya SPbGETU LETI*. 2008, no. 4, pp. 55–62. (In Russ.)

8. Filatov Yu. V. Analysis of the Operation of an Interference Angular Null Indicator. *Opt.-mekh. Prom-st'*. 1989, no. 4, pp. 13–17. (In Russ.)

9. Pavlov P. A., Larichev R. A., Filatov Y. V. Digital Autocollimating Null-Indicator for Dynamic Goniometry. Optical Engineering. 2020, vol. 59, no. 10, p. 104103. doi: 10.1117/1.OE.59.10.104103

10. Larichev R. A., Filatov Yu. V. An Autocollimation Null Detector: Development and Use in Dynamic Goniometry. Journal of Optical Technology. 2013, vol. 80, no. 9, pp. 554–557. doi: 10.1364/JOT.80.000554

11. Larichev R. A., Filatov Yu. V. The Influence of Reflecting Face Topography on Angular Measurements with Aids of Autocollimator. *Izvestiya SPbGETU LETI*. 2012, no. 7, pp. 90–96. (In Russ.)

12. Filatov Yu. V., Larichev R. A. Aberration Influence on Accuracy of Angle Measurements by Means of

Autocollimator. Proc. of SPIE – The Intern. Society for Optical Engineering. Munich, Germany, 22–25 June 2015, p. 95253O. doi: 10.1117/12.2184726

13. Pavlov P. A. Laser Dynamic Goniometer Measurement Algorithms. Measurement Techniques. 2008, vol. 51, no. 1, pp. 22–27. doi: 10.1007/s11018-008-0005-2

14. Filatov Yu. V., Nikolaev M. S., Larichev R. A., Pavlov P. A. Study of Adjustment Influence on the Au-

tocollimating Null-Indicator Accuracy. Proc. of SPIE – The Intern. Society for Optical Engineering. 11–16 Oct. 2020, p. 115520H. doi: 10.1117/12.2573769

15. Pavlov P. A. Aspects of the Cross-Calibration Method in Laser Goniometry. Measurement Techniques. 2015, vol. 58, no. 9, pp. 970–974. doi: 10.1007/s11018-015-0827-7

Information about the authors

Boniface Nyamweru, Assistant Lecturer at the Department of Legal and Industrial Metrology, College of Business Education CBE. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: optical metrology systems.

Address: College of Business Education CBE, Bibi Titi Mohamed St., Dar es Salaam 1968, Tanzania

E-mail: bonifacenyamweru23@gmail.com

Elizaveta V. Shishalova, Graduate Student of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: high precision angle measurements.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: lizabelaya.00@mail.ru

Правила для авторов статей

В редакцию журнала "Известия вузов России. Радиоэлектроника" необходимо представить:

- распечатку рукописи (1 экз.) – твердую копию файла статьи, подписанную всеми авторами (объем оригинальной статьи не менее 8 страниц, обзорной статьи не более 20 страниц);
- электронную копию статьи;
- отдельный файл для каждого рисунка и каждой таблицы в формате тех редакторов, в которых они были подготовлены. Размещение рисунка в электронной копии статьи не освобождает от его представления отдельным файлом;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- сведения об авторах и их электронную копию (на русском и английском языках) (1 экз.);
- рекомендацию кафедры (подразделения) к опубликованию (следует указать предполагаемую рубрику) (1 экз.);
- сопроводительное письмо (1 экз.).

Принимаются к публикации статьи на русском и английском языках.

Рукопись не может быть опубликована, если она не соответствует предъявляемым требованиям и материалам, представляемым с ней.

Структура научной статьи

Авторам рекомендуется придерживаться следующей структуры статьи:

- Заголовочная часть:
 - УДК (выравнивание по левому краю);
 - название статьи;
 - авторы (перечень авторов – Ф. И. О. автора (-ов) полностью. Инициалы ставятся перед фамилиями, после каждого инициала точка и пробел; инициалы не отрываются от фамилии. Если авторов несколько – Ф. И. О. разделяются запятыми), если авторов больше 3, необходимо в конце статьи указать вклад каждого в написание статьи;
 - место работы каждого автора и почтовый адрес организации. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, а затем список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
 - аннотация – 200–250 слов, характеризующих содержание статьи;
 - ключевые слова – 5–7 слов и/или словосочетаний, отражающих содержание статьи, разделенных запятыми; в конце списка точка не ставится;
 - источник финансирования – указываются источники финансирования (гранты, совместные проекты и т. п.). Не следует использовать сокращенные названия институтов и спонсирующих организаций;
 - благодарности. В данном разделе выражается признательность коллегам, которые оказывали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес статьи. Прежде чем выразить благодарность, необходимо заручиться согласием тех, кого планируете поблагодарить;
 - конфликт интересов – авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. Например, «Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов». Если конфликт интересов возможен, то необходимо пояснение (см. <https://publicationethics.org>).
- Заголовочная часть на английском языке:
 - название (Title);

- авторы (Authors);
 - место работы каждого автора (Affiliation). Необходимо убедиться в корректном (согласно уставу организации) написании ее названия на английском языке. Перевод названия возможен лишь при отсутствии англоязычного названия в уставе. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, затем приводится список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
 - аннотация (Abstract);
 - ключевые слова (Keywords);
 - источник финансирования (Acknowledgements);
 - конфликт интересов (Conflict of interest).
- Текст статьи.
 - Приложения (при наличии).
 - Авторский вклад. Если авторов больше 3, необходимо указать вклад каждого в написание статьи.
 - Список литературы (библиографический список);
 - Информация об авторах.

Название статьи должно быть информативным, с использованием основных терминов, характеризующих тему статьи, и четко отражать ее содержание в нескольких словах. Хорошо сформулированное название – гарантия того, что работа привлечет читательский интерес. Следует помнить, что название работы прочтут гораздо больше людей, чем ее основную часть.

Авторство и место в перечне авторов определяется договоренностью последних. При примерно равном авторском вкладе рекомендуется алфавитный порядок.

Аннотация представляет собой краткое описание содержания изложенного текста. Она должна отражать актуальность, постановку задачи, пути ее решения, фактически полученные результаты и выводы. Содержание аннотации рекомендуется представить в структурированной форме:

Введение. Приводится общее описание исследуемой области, явления. Аннотацию не следует начинать словами «Статья посвящена...», «Цель настоящей статьи...», так как вначале надо показать необходимость данного исследования в силу пробела в научном знании, почему и зачем проведено исследование (описать кратко).

Цель работы. Постановка цели исследования (цель может быть заменена гипотезой или исследовательскими вопросами).

Материалы и методы. Обозначение используемой методологии, методов, процедуры, где, как, когда проведено исследование и пр.

Результаты. Основные результаты (приводятся кратко с упором на самые значимые и привлекательные для читателя/научного сообщества).

Обсуждение (Заключение). Сопоставление с другими исследованиями, описание вклада исследования в науку.

В аннотации не следует упоминать источники, использованные в работе, пересказывать содержание отдельных разделов.

При написании аннотации необходимо соблюдать особый стиль изложения: избегать длинных и сложных предложений, выражать мысли максимально кратко и четко. Составлять предложения только в настоящем времени и только от третьего лица.

Рекомендуемый объем аннотации – 200–250 слов.

Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов/фраз – 5–7, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3.

Текст статьи излагается в определенной последовательности. Рекомендуется придерживаться формата IMRAD (Introduction, Methods, Results, Discussion; Введение, Методы, Результаты, Обсуждение):

Введение. Во введении автор знакомит с предметом, задачами и состоянием исследований по теме публикации; при этом необходимо обязательно ссылаться на источники, из которых берется информация. Автор приводит описание "белых пятен" в проблеме или того, что еще не сделано, и формулирует цели и задачи исследования.

В тексте могут быть применены сноски, которые нумеруются арабскими цифрами. В сносках могут быть размещены: ссылки на анонимные источники из Интернета, ссылки на учебники, учебные пособия, ГОСТы, авторефераты, диссертации (если нет возможности процитировать статьи, опубликованные по результатам диссертационного исследования).

Методы. Необходимо описать теоретические или экспериментальные методы исследования, используемое оборудование и т. д., чтобы можно было оценить и/или воспроизвести исследование. Метод или методологию проведения исследования целесообразно описывать в том случае, если они отличаются новизной.

Научная статья должна отображать не только выбранный инструментарий и полученные результаты, но и логику самого исследования или последовательность рассуждений, в результате которых получены теоретические выводы. По результатам экспериментальных исследований целесообразно описать стадии и этапы экспериментов.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. В описании полученных результатов не должно быть никаких пояснений – они даются в разделе «Обсуждение».

Обсуждение (Заключение и Выводы). В этой части статьи авторы интерпретируют полученные результаты в соответствии с поставленными задачами исследования, приводят сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Необходимо показать, что статья решает научную проблему или служит приращению нового знания. Можно объяснять полученные результаты на основе своего опыта и базовых знаний, приводя несколько возможных объяснений. Здесь излагаются предложения по направлению будущих исследований.

Список литературы (библиографический список) содержит сведения о цитируемом, рассматриваемом или упоминаемом в тексте статьи литературном источнике. В список литературы включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии).

Список литературы должен иметь не менее 15 источников (из них, при наличии, не более 20 % – на собственные работы), имеющих статус научных публикаций.

Приветствуются ссылки на современные англоязычные издания (требования МНБД Scopus – 80 % цитируемых англоязычных источников).

Ссылки на неопубликованные и нетиражированные работы не допускаются. Не допускаются ссылки на учебники, учебные пособия, справочники, словари, диссертации и другие малотиражные издания.

Если описываемая публикация имеет цифровой идентификатор Digital Object Identifier (DOI), его необходимо указывать в самом конце библиографической ссылки в формате "doi: ...". Проверять наличие DOI статьи следует на сайте: <http://search.crossref.org> или <https://www.citethisforme.com>.

Нежелательны ссылки на источники более 10–15-летней давности, приветствуются ссылки на современные источники, имеющие идентификатор doi.

За достоверность и правильность оформления представляемых библиографических данных авторы несут ответственность вплоть до отказа в праве на публикацию.

Аннотация на английском языке (Abstract) в русскоязычном издании и международных базах данных является для иностранных читателей основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах исследований. Зарубежные специалисты по аннотации оценивают публикацию, определяют свой интерес к работе российского ученого, могут использовать ее в своей публикации и сделать на нее ссылку, открыть дискуссию с автором.

Текст аннотации должен быть связным и информативным. При написании аннотации рекомендуется использовать Present Simple Tense. Present Perfect Tense является допустимым. Рекомендуемый объем – 200–250 слов.

Список литературы (References) для зарубежных баз данных приводится полностью отдельным блоком, повторяя список литературы к русскоязычной части. Если в списке литературы есть ссылки на иностранные публикации, то они полностью повторяются в списке, готовящемся в романском алфавите. В References совершенно недопустимо использовать российский ГОСТ 7.0.5–2008. Библиографический список представляется с переводом русскоязычных источников на латиницу. При этом применяется транслитерация по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>).

Типовые примеры описания в References приведены на сайте журнала <https://re.eltech.ru>.

Сведения об авторах

Включают для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание (с датами присвоения и присуждения), почетные звания (с датами присвоения и присуждения), краткую научную биографию, количество печатных работ и сферу научных интересов (не более 5–6 строк), название организации, должность, служебный и домашний адреса, служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты. Если ученых и/или академических степеней и званий нет, то следует указать место получения высшего образования, год окончания вуза и специальность. Также требуется включать идентификационный номер исследователя ORCID (Open Researcher and Contributor ID), который отображается как адрес вида <http://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>. При этом важно, чтобы кабинет автора в ORCID был заполнен информацией об авторе, имел необходимые сведения о его образовании, карьере, другие статьи. Вариант «нет общедоступной информации» при обращении к ORCID не допускается. В сведениях следует указать автора, ответственного за прохождение статьи в редакции.

Правила оформления текста

Текст статьи подготавливается в текстовом редакторе Microsoft Word. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля – верхнее и нижнее 2.5 см, левое и правое 2.25 см; колонтитулы – верхний 1.5 см, нижний 2.5 см. Применение полужирного и курсивного шрифтов допустимо при крайней необходимости.

Дополнительный, поясняющий текст следует выносить в подстрочные ссылки при помощи знака сноски, а при большом объеме – оформлять в виде приложения к статье. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) – в квадратных прямых.

Все сведения и текст статьи набираются гарнитурой "Times New Roman"; размер шрифта основного текста 11 pt, остальных сведений 10 pt; выравнивание по ширине; абзацный отступ 0.6 см; межстрочный интервал "Множитель 1.1"; автоматическая расстановка переносов.

Правила верстки списка литературы, формул, рисунков и таблиц подробно описаны на сайте <https://re.eltech.ru>.

Перечень основных тематических направлений журнала

Тематика журнала соответствует номенклатуре научных специальностей:

2.2 – Электроника, фотоника, приборостроение и связь:

- 2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника.
- 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.
- 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.
- 2.2.4 – Приборы и методы измерения (по видам измерений).
- 2.2.5 – Приборы навигации.
- 2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.
- 2.2.7 – Фотоника.
- 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.
- 2.2.9 – Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры.
- 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение.
- 2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы.

2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения.

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

2.2.16 – Радиолокация и радионавигация.

Указанные специальности представляются в журнале следующими основными рубриками:

"Радиотехника и связь":

- Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов.
- Проектирование и технология радиоэлектронных средств.
- Телевидение и обработка изображений.
- Электродинамика, микроволновая техника, антенны.
- Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- Радиолокация и радионавигация.

"Электроника":

- Микро- и наноэлектроника.
- Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника.
- Радиофотоника.
- Электроника СВЧ.

"Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы":

- Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн.
- Метрология и информационно-измерительные приборы и системы.
- Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий.

Адрес редакционной коллегии: 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 литера Ф, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", редакция журнала "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника"

Технические вопросы можно выяснить по адресу radioelectronic@yandex.ru

Известия высших учебных заведений России. **РАДИОЭЛЕКТРОНИКА**
Journal of the Russian Universities. **RADIOELECTRONICS**

Том 26 № 4 2023

Vol. 26 No. 4 2023

Научные редакторы А. М. Мончак, П. В. Апалина
Редакторы Э. К. Долгатов, И. Г. Скачек
Компьютерная верстка М. И. Поповой,
Е. И. Третьяковой

Science Editors A. M. Monchak, P. V. Apalina
Editors E. K. Dolgatov, I. G. Skachek
DTP Professional M. I. Popova
E. I. Tretyakova

Подписано в печать 28.09.23. Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Уч.-изд. л. 21.32. Печ. л. 20.5. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.) Заказ 117.
Цена свободная.

Signed to print 28.09.23. Sheet size 60×84 1/8.
Educational-ed. liter. 21.32. Printed sheets 20.5. Number of copies 300.
Printing plant 1–150 copies. Order no. 117.
Free price.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197022, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 Ф

ETU Publishing house
5 F Prof. Popov St., St Petersburg 197022, Russia