

ISSN 2500—0381

Электронная версия

ISSN 0021—3454

Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

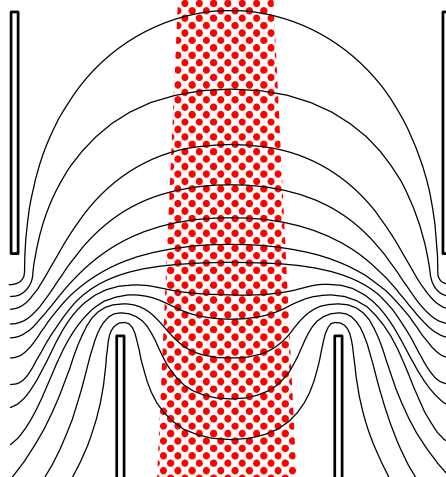
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ **2**

Т. 65
2022

Journal of **I**nstrument **E**ngineering



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

проф. А. А. БОБЦОВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. П. АЛЕШКИН, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
В. В. ГРИГОРЬЕВ, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. П. ГУРОВ, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. В. ЕФИМОВ, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
Т. А. ИСМАИЛОВ, проф., ДГТУ, Махачкала, Россия
В. М. МУСАЛИМОВ, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. О. НИКИФОРОВ, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
А. А. ПЫРКИН (зам. главного редактора), проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. Я. РАСПОПОВ, проф., ТГУ, Тула, Россия
Л. А. СЕВЕРОВ, проф., ГУАП, Санкт-Петербург, Россия
Б. В. СОКОЛОВ, проф., СПбФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия
В. С. ТИТОВ, проф., ЮЗГУ, Курск, Россия
В. С. ТОМАСОВ, доц., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. Б. ФЕДОРОВ, акад. РАН, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия
Н. Б. ФИЛИМОНОВ (зам. главного редактора), проф., МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
В. Б. ШЛИШЕВСКИЙ, проф., СГГА, Новосибирск, Россия
А. С. ЮЩЕНКО, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

С. В. АБЛАМЕЙКО, акад. НАН Беларуси, БГУ, Минск, Беларусь
Р. М. АЛГУЛИЕВ, акад. НАН Азербайджана, Институт информационных технологий НАНА, Баку, Азербайджан
Т. ЗЕЕГЕР, проф., Университет Зигена, Зиген, Германия
Т. ОРЛОВСКА-КОВАЛЬСКА, проф., Университет Технологий, Вроцлав, Польша
Э. РОМЕРО-КАДАВАЛ, проф., Университет Экстремадура, Бадайоз, Испания
Р. СТЖЕЛЕЦКИ, проф., Институт Электротехники в Варшаве, Гдыня, Польша

Ответственный секретарь *М. В. Лебецкая*

Редактор *Л. Г. Позднякова*

Набор, верстка: *М. В. Герасимова*

Перевод: *Ю. И. Копилевич*

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А, Университет ИТМО

Телефон: (812) 480-02-73, E-mail: pribor@mail.ifmo.ru

[http:// pribor.ifmo.ru/](http://pribor.ifmo.ru/)

Подписано в печать 10.03.2022 г.

Отпечатано в учреждении „Университетские телекоммуникации“

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А

Телефон: (812) 915-14-54, E-mail: Prudentov@tibir.ru

Редколлегия просит авторов и рецензентов отнестись с пониманием к ужесточению требований к рукописям и изменению формы подачи материала в журнале.

Аннотация объемом 150—250 слов должна отражать содержание статьи: предмет исследования, цель работы, метод проведения работы, краткое описание экспериментальных или теоретических исследований, полученные результаты и рекомендации по их применению.

Ключевые слова, служащие идентификаторами при предметном поиске, должны однозначно отражать содержание статьи. Основное ключевое слово/словосочетание указывается первым, общее количество ключевых слов — не менее 5.

Список литературы: для обзорной статьи рекомендуется приводить не менее 50 источников, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8 (при составлении списка преимущество следует отдавать изданиям, включенным в международные базы цитирования Scopus и Web of Science).

Новые требования к оформлению рукописи размещены на сайте журнала <http://pribor.ifmo.ru/>



Адрес: 197101, Санкт-Петербург,
Кронверкский пр., 49, лит. А, Университет ИТМО
Телефон: (812) 480-02-73
[http:// pribor.ifmo.ru/](http://pribor.ifmo.ru/)
E-mail: pribor@mail.ifmo.ru

Журнал публикует научные обзоры, полнотекстовые статьи и краткие сообщения, отражающие результаты практических и теоретических исследований в области приборостроения.

Журнал содержит следующие разделы: информационные технологии и системы, приборы и системы автоматического управления, вычислительная техника, приборы навигации, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, оптические и оптико-электронные приборы и системы, акустические приборы и системы, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, приборы, системы и изделия медицинского назначения, технология приборостроения, научные и практические разработки. По договоренности с Редакцией может быть опубликован специальный тематический выпуск, посвященный достаточно узкой проблеме приборостроения.

Рукопись подается по электронной почте: pribor@mail.ifmo.ru. Редакция принимает рукопись к рецензированию при условии получения полного комплекта документов, включающего:

- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (формат PDF);
- файлы рукописи статьи, оформленные в соответствии с требованиями журнала;
- сведения об авторах, заполненные по шаблону (на русском и английском языке);
- договор о передаче авторских прав.

Рукопись должна содержать:

- название статьи (на русском и английском языке), индекс УДК;
- аннотацию (150—250 слов, на русском и английском языке), ключевые слова (не менее 5 и не более 25, на русском и английском языке), основной текст, список литературы;
- рисунки: каждый на отдельном листе формата А4 (не заверстывать в текст), таблицы.

Объем текста (оформленного в соответствии с требованиями журнала — шрифт Times New Roman, размер — 14 пт, междустрочный интервал 1,5, поля — сверху и слева 25 мм, снизу 20 мм, справа 10 мм) должен составлять 10—20 страниц, краткого сообщения — 3—5. Объем обзора предварительно согласовывается с Редакцией.

Список литературы (рекомендуется): для обзорной статьи — не менее 50, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8 литературных источников (не менее половины из них должны представлять собой ссылки на издания, включенные в международные базы цитирования Scopus и Web of Science). Список литературы должен формироваться в порядке появления ссылок в тексте.

Не допускается выравнивание с помощью пробелов, табуляций и символов конца абзаца. Эти символы при необходимости могут вставляться не более одного раза подряд (**не переносить с помощью дефисов**).

Формулы и отдельные символы набираются с использованием редактора формул MathType (Microsoft Equation). **Не вставлять** формулы из пакетов MathCad и MatLab. Размер шрифта в формулах — по умолчанию. Все переменные набираются курсивом, греческие буквы — прямым шрифтом, полужирные символы в формуле — стилем „матрица вектор“, русские символы — стилем „текст“, векторы следует набирать полужирным шрифтом без стрелок.

Рисунки выполняются в градациях серого в одном из форматов приложений Microsoft (Word, Excel, PowerPoint), предпочтителен векторный формат. Кривые на графиках следует помечать цифрами (1, 2, 3 и т.д.) или/и задавать линиями разного стиля (пунктир, штрихпунктир, жирная); толщина осей должна быть не менее 0,5 пт, иначе качество печати не гарантируется.

Датой поступления статьи считается последняя после доработки.

Плата за публикацию не взимается.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Коробков И. Л.** Метод оценивания максимального времени передачи пакетов в сетях со сквозной маршрутизацией и временным мультиплексированием .. 77

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Сечак Е. Н., Ерхова Н. Ф., Колесников А. О.** Метод адаптации составного главного зеркала телескопа 87
- Костюк Г. К., Шкуратова В. А., Петров А. А., Сергеев М. М.** Фазовые маски из двулучепреломляющих пластин для получения заданного очертания лазерных пучков с ультракороткими импульсами при обработке материалов в плоскости изображения 101
- Шаламай Л. И., Майоров Е. Е., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оксас Н. С.** Определение рабочей толщины слоя современного стоматологического блокера методом спектроскопии 112

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

- Алёшкин А. П., Гусаков В. М., Цыкунов В. Н.** Результаты моделирования процесса отражения псевдослучайного сигнала от покрытия с управляемыми параметрами 118
- Заярный В. П., Нефёдов Е. И., Сидякин Ю. И., Пономарев И. Н., Заярный Д. В.** Оптимизация конструкции дисковой антенны кругового обзора микроволнового диапазона для датчиков, содержащих приемопередающие устройства 125
- Байдено С. В.** Проблематика улучшения характеристик фотоэлектрических преобразователей угла 132
- Фоменкова А. А.** Анализ работоспособности систем анаэробной биологической очистки сточных вод в процессе эксплуатации 140

EDITOR-IN-CHIEF

prof. ALEXEY BOBTSOV

EDITORIAL BOARD

ALESHKIN ANDREY, prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia

GRIGORIEV VALERY, prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia

GUROV IGOR, prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia

EFIMOV VLADIMIR, prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia

ISMAILOV TAGIR, prof., DSTU, Makhachkala, Russia

MUSALIMOV VIKTOR, prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia

NIKIFOROV VLADIMIR, prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia

PYRKIN ANTON, prof., Deputy Chief Editor, ITMO University, St. Petersburg, Russia

RASPOPOV VLADIMIR, prof., TSU, Tula, Russia

SEVEROV LEONID, prof., SUAI, St. Petersburg, Russia

SOKOLOV BORIS, prof., SPbFRC RAS, St. Petersburg, Russia

TITOV VITALY, prof., SWSU, Kursk, Russia

TOMASOV VALENTIN, prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia

FEDOROV IGOR, acad., N. E. Bauman MSTU, Moscow, Russia

FILIMONOV NIKOLAY, prof., Deputy Chief Editor, M. V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia

SHLISHEVSKY VIKTOR, prof., SSGA, Novosibirsk, Russia

YUSHCHENKO ARKADY, prof., N. E. Bauman MSTU, Moscow, Russia

FOREIGN MEMBERS

ABLAMEYKO SERGEY, acad., Belarusian State University, Minsk, Belarus

ALGULIYEV RASIM, acad., Institute of Information Technology of ANAS, Baku, Azerbaijan

ORLOWSKA-KOWALSKA TERESA, prof., University of Technology, Wroclaw, Poland

ROMERO-CADAVAL ENRIQUE, prof., University of Extremadura, Badajoz, Spain

SEEGER THOMAS, prof., University of Siegen, Siegen, Germany

STRZELECKI RYSZARD, prof., Electrotechnical Institute in Warsaw, Gdynia, Poland

Executive secretary Marina V. Lebetskaya

Editor Lidia G. Pozdniakova

Page-proof, makeup Maria V. Gerasimova

Translation of Yuriy I. Kopilevich

Address: ITMO University, Kronverksky pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia,
197101

Tel: (812) 480-02-73

Site: pribor.ifmo.ru

E-mail: pribor@mail.ifmo.ru

THE MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 65

FEBRUARY 2022

No 2

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS, COMPUTER TECHNIQUE

- Korobkov I. L.** Method for Estimating the Maximum Packet Transmission Time in Networks with End-to-End Routing and Time Multiplexing 77

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Sechak E. N., Erkhova N. F., Kolesnikov A. O.** Method for Adaptation of Segmented Primary Telescope Mirror 87
- Kostyuk G. K., Shkuratova V. A., Petrov A. A., Sergeev M. M.** Phase Masks Made of Birefringent Plates for Shaping Laser Beams with Ultrashort Pulses for Laser Material Processing in the Image Plane 101
- Shalamay L. I., Maiorov E. E., Mendosa E. Yu., Lampusova V. B., Oksas N. S.** Determination of the Working Layer Thickness of a Modern Dental Blocker by Spectroscopy 112

SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

- Aleshkin A. P., Gusakov V. M., Tsykunov V. N.** Results of Modeling a Pseudorandom Signal Reflection from a Coating with Controlled Parameters 118
- Zayarnyi V. P., Nefyodov E. I., Sidyakin Yu. I., Ponomarev I. N., Zayarnyi D. V.** Optimization of Microwave Circular-View Disc Antenna Design for Sensors Containing Transceivers 125
- Baidenko S. V.** Problem of Improving the Characteristics of Photoelectric Angle Converters 132
- Fomenkova A. A.** Analysis of the Performance of Anaerobic Biological Wastewater Treatment Systems during Operation 140

To the Authors!

The Journal of Instrument Engineering publishes scientific reviews, full-text articles and short messages, reflecting the unpublished results of theoretical and practical research in the field of fundamental instrument making.

The Journal publishes articles on the following themes: information technologies and systems, devices and automatic control systems, computer engineering, gyroscopic and navigation systems, instruments of precision mechanics, electronic and electromagnetic devices, optical and optoelectronic devices and systems, thermal regimes and reliability of devices and systems, technology and instrumentation, scientific and practical development. In agreement with the Editorial Board can be published a special themed issue devoted to a fairly narrow issue of instrumentation.

The material of the article accepted in electronic form and on any media, executed in a text editor Word without formatting along with a hard copy on A4. Electronic version of the paper may be sent by E-mail: **pribor@mail.ifmo.ru**

The size of the article (in printed form) must not exceed eight pages, a short presentation of two. Size scientific review previously agreed with the Editorial Board.

Submission includes two copies of:

— the manuscript text; list of references (recommended): review article — not less than 50, for the full text of the article — no less than 15, for short messages — at least 8 of the literary source (at least half of them should be links to the editions listed in international database of citation Scopus and Web of Science); number citations consecutively as they appear in the text;

— extended abstract (150—250 words);

— keywords (not less than 5 and not more than 25);

— illustrations: each on a separate sheet of A4 (not overestimate in the text) — big, with a maximum fill;

— the recommendation of the Department (laboratory);

— information about the authors on a template (surname, name, patronymic, name of the organization in accordance with the latest edition of the Charter, the address of the organization, academic degree and title, position, e-mail address).

The article must also enclose agreement on the transfer of copyright.

The main text. The following requirements are common to good practice in the design documents.

Font — Times New Roman, size 14, line spacing 1.5, margins — top and left — 25 mm, bottom — 20 mm, right — 10 mm.

Not allowed alignment with spaces, tabs and end of a paragraph (in the layout will need to be cleared). These symbols must be inserted only when necessary, and not more than once in a row (not to carry with dashes).

Don't insert formulas from MathCad or MatLab!

Figures and tables are to be inserted after the list of references. Graphics are accepted in one of Microsoft formats (Word, Excel, and PowerPoint); vector format is preferable. Don't use color graphics; it is better to apply dotted, dash-and dot lines, etc., or mark lines with numerical symbols.

Editorial Staff

**МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПЕРЕДАЧИ ПАКЕТОВ
В СЕТЯХ СО СКВОЗНОЙ МАРШРУТИЗАЦИЕЙ И ВРЕМЕННЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ**

И. Л. КОРОБКОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
ilya.korobkov.l@gmail.com*

Аннотация. Проведен сравнительный анализ решений, предназначенных для оценки максимального времени передачи пакетов по маршруту в сетях авионики со сквозной маршрутизацией и временным мультиплексированием. Предложен метод оценивания максимального времени передачи пакетов, учитывающий особенности рассматриваемых сетей авионики, включая таблицы расписаний и максимальное время ожидания освобождения канальных ресурсов. Проведена серия вычислительных экспериментов, продемонстрировавшая адекватность и работоспособность предложенного метода.

Ключевые слова: математическая модель, худший случай, максимальное время передачи пакетов, сети со сквозной маршрутизацией и временным мультиплексированием, таблица расписаний

Ссылка для цитирования: Коробков И. Л. Метод оценивания максимального времени передачи пакетов в сетях со сквозной маршрутизацией и временным мультиплексированием // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 77—86. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-77-86.

**METHOD FOR ESTIMATING THE MAXIMUM PACKET TRANSMISSION TIME
IN NETWORKS WITH END-TO-END ROUTING AND TIME MULTIPLEXING**

I. L. Korobkov

*ITMO University, St. Petersburg, Russia
ilya.korobkov.l@gmail.com*

Abstract. A comparative analysis of existing solutions to estimating the maximum packet transmission time in networks with end-to-end routing and time multiplexing is carried out. A method for estimating the maximum packet transmission time is proposed, with the account for the features of the considered avionics networks including schedule tables and the maximum waiting time for the release of channel resources. Presented results of a series of computational experiments demonstrate the adequacy and efficiency of the proposed method.

Keywords: mathematical model, worst case, maximum packet transmission time, networks with end-to-end routing and time multiplexing, scheduling table

For citation: Korobkov I. L. Method for estimating the maximum packet transmission time in networks with end-to-end routing and time multiplexing. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 2. P. 77—86 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-77-86.

Введение. Временное мультиплексирование (ВМ) применяется для упорядочивания потоков пакетов во времени в авиационных вычислительных системах (ВС) интегрированной модульной авионики. В основе компьютерных сетей, использующих временное мультип-

лексирование (KCBM), лежат сетевые стандарты SpaceWire [1—5] и GigaSpaceWire [6] с транспортными протоколами, поддерживающими BM, а именно СТП-ИСС, SpaceWire-D [7], SpaceWire-T [8] (рассматривается в аспектах BM). Сети рассматриваются в научных и социально-экономических целях и системах. BM обеспечивает доставку пакетов в течение регламентированного времени (T_{req}), несмотря на ограниченную пропускную способность каналов, обусловленную массогабаритными требованиями. При BM выдача данных в сеть осуществляется согласно расписаниям, состоящим из временных интервалов (тайм-слотов), в течение которых разрешена передача [9]. Таблица расписаний (TP), содержащая расписания для узлов, описывает работу сети с BM.

Исследуемые сетевые стандарты SpaceWire и GigaSpaceWire полностью совместимы на сетевом уровне. В настоящей работе рассматривается пакетная передача, которая выполняется при помощи сквозной (или червячной, от англ. *wormhole*) маршрутизации. В транспортных протоколах с BM, использующихся поверх стандартов, могут быть указаны фиксированные приоритеты пакетов при выдаче с терминального узла (например, протокол СТП-ИСС), процесс передачи пакета не прерывается передачей высокоприоритетного пакета. TP относится только к узлам с поддержкой СТП-ИСС, SpaceWire-D и SpaceWire-T (в части TP на узлах), задано ограничение пропускной способности каналов (ОПК). В рамках одного трафика размеры пакетов фиксированные.

При проектировании ВС требуется проверить корректность TP на худший случай — максимальное время передачи пакетов по маршруту (T_{maxPath}). Если $T_{\text{maxPath}} > T_{\text{req}}$, пакеты будут доставлены по истечении заданного срока, что для чувствительных к задержкам систем недопустимо. Такие TP не должны допускаться к эксплуатации, кроме отдельных исключительных случаев.

Анализ подходов. На сегодняшний день известны следующие подходы и программные инструменты для оценивания времени передачи пакетов: аналитические — модель Кнудсен—Мадсена [10]; модель Ренера [11]; Network Calculus [12]; метод расчета задержек для канальных контроллеров SpaceWire/GigaSpaceWire [13, 14]; инструменты проектирования и моделирования — TTEPlan [15], MASIW [16], OPNET [17], SNL [18], VisualSim [19], SWIS, SHINE [20], MOST [21].

Модель Кнудсен—Мадсена позволяет вычислить пропускную способность, на основе которой можно определить время передачи пакета: она не учитывает TP, наличие приоритетности трафиков и максимально релевантного ожидания освобождения канального ресурса двумя и более трафиками.

Коммуникационная модель Ренера служит для вычисления задержек с учетом коммутационных элементов, количества обращений к памяти, шинам, арбитраж. Однако, как и в модели Кнудсен—Мадсена, не учитываются приоритет и выдача данных по TP, в частности не учитывается механизм виртуальных каналов с разбиением пакетов на кадры и их передачи в разных тайм-слотах.

Система Network Calculus (NC) позволяет выполнять стохастическое (SNC) и детерминированное (DNC) алгебраическое моделирование. DNC дает прогноз худшего случая и гарантирует, что реальные задержки будут не превысят заданных пределов. Основными недостатками подходов SNC и DNC являются узконаправленная специфичность, чрезмерная вычислительная сложность при получении оценок, интенсивно прогрессирующая при росте сети [22]. В известных работах, описывающих применение DNC для анализа сетей, подобных SpaceWire, в совокупности не учитывается наличие в ВС трафиков, пакеты которых (например контрольно-сигнальные) могут выдаваться в любой тайм-слот [23].

В работе [14] предложен метод расчета средних значений временных задержек для канальных контроллеров, построенных на исследуемых сетях SpaceWire, GigaSpaceWire. Однако задержки вычисляются для канального соединения „точка—точка“, а не всего маршрута,

не учитывается выдача данных по ТР, а также худший случай — максимальное ожидание освобождения канальных ресурсов сети.

TTEPlan — коммерческий инструмент планирования для сетей TTEthernet и AFDX. Учитываются требования по времени доставки сообщений, виртуальные каналы, размеры кадров. Однако TTEPlan не учитывает особенности сетей SpaceWire, GigaSpaceWire и является закрытым коммерческим продуктом.

MASIW (Modular Avionics System Integrator Workplace) — среда для автоматизации проектирования авионики, разработанная совместно коллективами ГосНИИАС и Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН. Этот инструмент поддерживает широкие функциональные возможности (составление циклограмм расписаний запуска приложений на процессоре), включая расчеты времени доставки сообщений от отправителя к получателю путем имитационного моделирования. MASIW не позволяет работать с сетями SpaceWire, GigaSpaceWire.

Существует ряд систем моделирования, имитирующих обмена пакетами в сетях SpaceWire и позволяющих замерять время передачи пакетов: OPNET, SNL, VisualSim, SWIS, SHINE, MOST. Интерес представляют SHINE и MOST, выполняющие моделирование не только SpaceWire, но и SpaceFibre. Однако они не поддерживают стандарт GigaSpaceWire и транспортные протоколы с BM, специально разработанные для этих сетей, являются закрытыми коммерческими продуктами, что не позволяет удостовериться в адекватности получаемых результатов.

Следовательно, актуальной задачей является разработка универсального математического метода для оценки корректности ТР по максимальному времени передачи пакетов для сетей SpaceWire, GigaSpaceWire с поддержкой BM на транспортном уровне.

Метод оценки корректности таблиц расписаний. В выполнении следующих четырех общих шагов состоит суть предлагаемого универсального метода.

Начальное задание параметров элементам сети (a_i) происходит на шаге 1: передающим портам узлов и коммутаторов a_i указывается расписание (или ТР из одной строки тайм-слотов), приоритеты и ОПК (а также скорость, периодичность, размеры пакетов). Поскольку стандарты SpaceWire и GigaSpaceWire в коммутаторах не позволяют учитывать приоритеты пакетов и не поддерживают BM, то приоритеты указываются одинаковыми, передача разрешена в любой тайм-слот.

Для ТР на шаге 2 (рис. 1) выполняется обособление тайм-слотов в отдельные группы — подрасписания h , в рамках которых наблюдается постоянство характеристик процесса передачи данных и участников обменов. Перечень подрасписаний обозначим множеством H ($h \in H$).

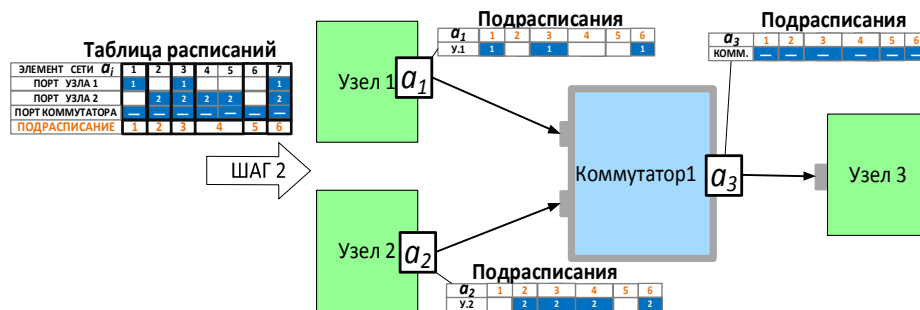


Рис. 1

Время выдачи пакетов является случайным, поскольку значимые для функционирования трафика с асинхронной генерацией в любой тайм-слот передаются в рамках одной проводной сети с периодическими потоками, что привносит стохастичность. Используется аналитическая модель разомкнутой сети систем массового обслуживания (СМО) для описания процесса передачи пакетов в КСВМ ВС, а именно a_i описывается отдельной СМО с относи-

тельными приоритетами. В практических задачах используется подобная практика применения теории массового обслуживания [24].

Максимальная задержка передачи пакетов i информационного потока по h ($h \in H$) для a_i ($T_i^{(h)}$) вычисляется на шаге 3. Для этого применяется специально разработанная СМО [25], поскольку обладает универсальностью и может быть применена для оценки сетей SpaceWire, GigaSpaceWire с протоколами SpaceWire-D, СТП-ИСС, позволяет учесть фиксированные приоритеты и червячную маршрутизацию при предположении, что в роли заявки СМО выступает пакет.

Вычисляется $T_i^{(h)}$ в предположении того, что пакеты одновременно поступают во входной интерфейс порта выдачи пакетов, наибольший по размеру пакет имеет высший приоритет и будет передан первым, пакет с меньшим приоритетом пойдет в отдельный буфер (очередь):

$$\forall i \in I_{a_i}^{(h)}, T_i^{(h)} = \max_{g \in I_{a_i}^{(h)}, g \neq i} (T_{\text{packetPort}}(g)) + T_{\text{packetPort}}(i) z_{\max}(i) + \Psi(i), \quad (1)$$

где $I_{a_i}^{(h)}$ — конечное множество потоков, проходящих через a_i при подраписании h ; $T_{\text{packetPort}}$ — время прохождения пакета через порт; $z_{\max}$ — худшее, т.е. наибольшее, количество пакетов в буфере ожидания для i потока; $\Psi(i)$ — время, за которое пакеты с более высокими приоритетами (τ) и пакеты с равным приоритетом (γ) освободят порт, и отправка пакета i потока станет возможной.

Параметр $z_{\max}(i)$ является стохастической величиной из-за асинхронного характера генерации и прихода пакетов:

$$z_{\max}(i) = \sum_{j=1}^{K(i)} j \cdot p_{q,\max}(i, j), \quad (2)$$

$$p_{q,\max}(i, j) = \begin{cases} 1, & p_q(i, j) + \zeta_{\max}(i, j) \geq 1, \\ p_q(i, j) + \zeta_{\max}(i, j), & p_q(i, j) + \zeta_{\max}(i, j) < 1, \end{cases}$$

где $K(i)$ — размер очереди для пакетов i потока: $z_{\max}(i) \leq K(i)$. Вероятность $p_q(i, j)$ того, что в буфере (очереди) для i потока ожидают j пакетов (заявок), вычисляется как сумма предельных вероятностей $p_{i_0, i_1, \dots, i_{N-1}, i_N}$, соответствующих состояниям системы, при которых в очереди СМО i потока находятся j заявок [25]; $p_{q,\max}(i, j)$ — максимальная вероятность, что в очереди i трафика ожидают обслуживания j заявок.

$\zeta_{\max}(i, j)$ — абсолютная погрешность разброса $p_{q,\max}(i, j)$ от величины $p_q(i, j)$. Для того чтобы $z_{\max}$ отражала не среднее, а худшее максимальное, введено $\zeta_{\max}(i, j)$. Имеется практика применения вероятностных величин марковских процессов для определения максимального количества заявок и времени обслуживания, например, в работе [26].

Метод Корнфельда [2] используется для расчета $\zeta_{\max}(i, j)$. В методе Корнфельда абсолютная погрешность вычисляется следующим образом:

$$\Delta X = (X_{\max} - X_{\min}) / 2, \quad X_{\max} = X_{\text{avg}} + \Delta X \quad (3)$$

где $X_{\max}$ и $X_{\min}$ — максимальное и минимальное значение измеряемой случайной величины. Случайной величиной является вероятность нахождения СМО в одном из состояний. Такая величина может принимать теоретические экстремумы: 0 или 1, тогда $\Delta X = (1-0)/2 = 0,5$.

Максимум случайной величины СМО теоретически составит:

$$P_{\max, \text{теор}} = p_{i_0, \dots, i_{N-1}, i_N} + 0,5. \quad (4)$$

В теории ошибок обосновано использование метода Корнфельда для оценок максималь-

ного отклонения случайной величины от среднего значения [27].

Благодаря наличию нормировочного условия

$$p_{0,0,\dots,0,0} + \sum_{j=0}^K p_{1,0,\dots,0,j} + \sum_{j=0}^K p_{1,0,\dots,1,j} + \dots + \sum_{j=0}^K p_{N,K,\dots,K,j} = 1$$

указанные рассуждения можно применить и для $p_q(i,j)$. В результате $\zeta_{\max}(i,j)$ составит:

$$\zeta_{\max}(i,j) = \frac{1-0}{2} = 0,5. \quad (5)$$

Следует указывать $\zeta_{\max}(i,j) = \sup(1) = 0,9$ для гарантированно худшего случая. На основе статистических испытаний величина $\zeta_{\max}(i,j)$ может быть уточнена.

Предлагается следующая формула для вычисления $\Psi(i)$:

$$\Psi(i) = \sum_{\tau \in hp(i)} T_{\text{packetPort}}(\tau) z_{\max}(\tau) + \sum_{\gamma \in ep(i)} T_{\text{packetPort}}(\gamma) \cdot \min(z_{\max}(i), z_{\max}(\gamma)), \quad (6)$$

где $z_{\max}(\tau)$ и $z_{\max}(\gamma)$ — максимальное количество пакетов в очереди τ и γ потоков. Расчеты $z_{\max}(\tau)$, $z_{\max}(\gamma)$ аналогичны $z_{\max}(i)$.

Приведенные рассуждения справедливы лишь для случая, что был хотя бы передан хотя один байт пакета на h :

$$\Omega_{\max}(i) \cdot S_{N\text{Char}}(i) \geq 1, \quad (7)$$

где $\Omega_{\max}(i)$ — максимальное количество переданных пакетов на h ; $S_{N\text{Char}}$ — пакет максимального размера в потоке.

Стохастический параметр $\Omega_{\max}(i)$ зависит от $\varepsilon_{\max}(i)$ — абсолютной погрешности разброса $p_{e,\max}(i)$ от величины $p_e(i)$, т.е. вероятности того, что пакет i потока будет передан, вычисляемой как сумма предельных вероятностей $p_{i_0,i_1,\dots,i_{N-1},i_N}$, нахождения СМО в состояниях, при которых пакет (заявка) будет принят к обслуживанию, т.е. передачи. $\varepsilon_{\max}(i)$ необходима, чтобы $\Omega_{\max}(i)$ соответствовала худшему случаю. $\Omega_{\max}(i)$ вычислим:

$$\Omega_{\max}(i) = \lambda_i p_{e,\max}(i) T_h, \quad (8)$$

$$p_{e,\max}(i) = \begin{cases} 1, & p_e(i) + \varepsilon_{\max}(i) \geq 1, \\ p_e(i) + \varepsilon_{\max}(i), & p_e(i) + \varepsilon_{\max}(i) < 1; \end{cases} \quad (9)$$

$$p_e(i) = 1 - p_f(i), \quad (10)$$

где $p_f(i)$ соответствует сумме предельных вероятностей состояний системы $p_{i_0,i_1,\dots,i_{N-1},i_N}$, при которых очереди для пакетов i потока полностью заняты; T_h — время h исполнения подрасписания.

Также используется метод Корнфельда для определения величины $\varepsilon_{\max}(i)$. Для гарантированно худшего случая $\varepsilon_{\max}(i) = \sup(1) = 0,9$.

Важно учесть, что в крайний тайм-слот могла быть начата передача пакета максимального размера, назначенного на предыдущее подрасписание h . Передача пакета не прерывается. Следовательно, на следующем подрасписании $h+1$ следует уменьшить свободное время для выдачи пакета: $T_h = T_h - \max_{u \in I_{ai}^{(h-1)}} (T_{\text{packetPort}}(u))$.

Кроме того, пакет может быть так велик, что займет целиком чужой тайм-слот, и ожидающий в буфере пакет так и не будет передан. С учетом вышесказанного получим окончательные формулы для $T_i^{(h)}$:

$$\forall i \in I_{a_i}^{(h)}, T_i^{(h)} = \begin{cases} \max_{g \in I_{a_i}^{(h)}, g \neq i} (T_{\text{packetPort}}(g)) + T_{\text{packetPort}}(i) z_{\max}(i) + \\ + \sum_{\tau \in hp(i)} T_{\text{packetPort}}(\tau) z_{\max}(\tau) + \\ + \sum_{\gamma \in ep(i)} T_{\text{packetPort}}(\gamma) \min(z_{\max}(i), z_{\max}(\gamma)), \quad \Omega_{\max}(i) \cdot S_{\text{NChar}}(i) \geq 1, \\ T_h, \quad \Omega_{\max}(i) \cdot S_{\text{NChar}}(i) < 1 \wedge z_{\max}(i) > 0, \end{cases} \quad (11)$$

$$\Omega_{\max}(i) = \lambda_i p_{e,\max}(i) \left(T_h - \max_{u \in I_{a_i}^{(h-1)}} (T_{\text{packetPort}}(u)) \right), \quad (12)$$

$$p_{e,\max}(i) = \begin{cases} 1, & p_e(i) + \varepsilon_{\max}(i) \geq 1, \\ p_e(i) + \varepsilon_{\max}(i), & p_e(i) + \varepsilon_{\max}(i) < 1; \end{cases}$$

$$z_{\max}(i) = \sum_{j=1}^{K(i)} j \cdot p_{q,\max}(i, j), \quad (13)$$

$$p_{q,\max}(i, j) = \begin{cases} 1, & p_q(i, j) + \zeta_{\max}(i, j) \geq 1, \\ p_q(i, j) + \zeta(i, j), & p_q(i, j) + \zeta_{\max}(i, j) < 1. \end{cases}$$

На шаге 4 предлагаемого метода оценки корректности ТР вычисляется T_{maxPath} . Передача пакетов информационного потока представляется в виде упрощенного конвейерного процесса, в котором время передачи пакета складывается из двух величин: время передачи первого байта пакета через весь маршрут и следующий за ним без промедления оставшейся части пакета, что соответствует червячной маршрутизации. Передача пакета осуществляется с максимальной задержкой — используется „худшее“ время передачи байта пакета через элементы маршрута:

$$T_{\text{maxPath}}(i) = T_{\text{worstVertex}}(i) \cdot (Q_A + S_{\text{NChar}}), \quad (14)$$

$$T_{\text{worstVertex}} = \max(T_{\text{maxSch}}(1), T_{\text{maxSch}}(2), \dots, T_{\text{maxSch}}(a_i), \dots, T_{\text{maxSch}}(Q_A)) / S_{\text{NChar}}, \quad (15)$$

$$T_{\text{maxSch}}(a_i) = \max(T_i^{(1)}, T_i^{(2)}, \dots, T_i^{(h)}, \dots, T_i^{(Q_H)}), \quad (16)$$

где $T_{\text{worstVertex}}$ — максимальная задержка передачи байта пакета i потока через элементы сети (худший случай), встречающиеся по маршруту, при рассмотрении подрасписания, вносящего максимальную задержку; Q_A — число элементов сети на маршруте; T_{maxSch} — максимальная задержка при прохождении пакета по расписанию среди h .

ТР корректна по максимальному времени передачи пакета, если $T_{\text{maxPath}} \leq T_{\text{req}}$ для потока i . В некоторых случаях требуется найти величину запаздывания пакета (джиттер). Это можно сделать следующим образом: $T_{\text{maxPath}} - T_{\text{avgPath}}$, где T_{avgPath} — среднее время передачи пакетов через весь маршрут. Для получения T_{avgPath} следует придерживаться рассуждений, как для T_{maxPath} , однако с поправкой: брать среднее арифметическое вместо максимума на шагах 3 и 4.

Вычислительные эксперименты. Проведены вычислительные эксперименты для оценки адекватности разработанной СМО и предложенного метода оценки корректности таблиц расписаний на компьютерной модели коммутатора SpaceFibre, разработанной на SystemC/C++ с применением Cadence VSP. Модель коммутатора SpaceFibre сконфигурирована таким образом, что приоритеты, ассоциированные с потоками данных, имели фиксированные приоритеты, которые не меняли своего значения, отсутствовали повторяющиеся значения приоритетов. При таких настройках можно пренебречь различием в механизмах управле-

ния потоком и подтверждениями. Поскольку потоки по приоритетам не пересекаются, а подтверждения не образовывали очередей, при такой настройке логика передачи пакетов соответствовала механизмам сети SpaceWire/GigaSpaceWire с транспортным протоколом ВМ, например, СТП-ИСС. Характеристики потоков приведены в табл. 1. Количество итераций моделирования ТР ~15 000.

Таблица 1

Параметры для вычислительных экспериментов	
Параметр	Значение
Число трафиков	8
Размер пакетов, байт	256, 512, 768, 1024, 1280, 1536, 1792, 2048
Периодичность выдачи, мкс	~158,4
Размер таблицы расписаний	15 тайм-слотов
Размер тайм-слота, мкс	65,234375
Скорость в каналах, Гбит/с	1,25

Полученные результаты представлены на рис. 2.

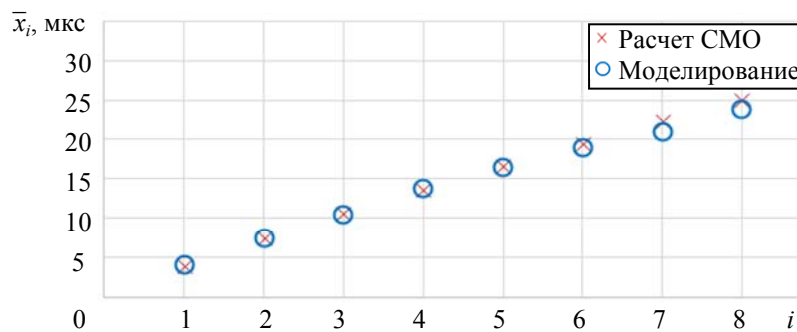


Рис. 2

Относительная погрешность между компьютерным моделированием и расчетами на СМО составила 3,5 %, среднее квадратическое отклонение $\sigma_i=2,12$ мкс. Полученные результаты позволяют удостовериться, что СМО адекватно описывает процесс приоритетного обслуживания пакетов.

Также проведено моделирование случая одновременного поступления пакетов синхронно-периодических пяти трафиков во входной интерфейс порта, оценивалось максимальное время передачи пакетов по расписанию $T_{\max\text{Sch}}$. Вычислена вероятность $P_{\max}$ того, что время передачи составит $T_{\max\text{Sch}}$ по формуле:

$$P_{\max}(i) = 1 - F(T_{\max\text{Sch}}, \bar{x}_i, \sigma_i), \quad (17)$$

где F — функция нормального распределения; $\bar{x}_i$ — среднее время передачи пакетов по расписанию. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты моделирования					
Параметр	Трафик				
	1	2	3	4	5
Приоритеты фиксированные, неповторяющиеся	0	1	2	3	4
Размер пакетов, байт	256	2048	256	256	256
Период пакетов, мкс	5000	16000	20000	1500	1000
$T_{\max\text{Sch}}$, мкс	4,224	78,144	80,256	82,37	84,48
$T_{\max\text{SchSim}}$, мкс	4,152	71,97	52,83	57,06	61,28
$\bar{x}_i$, мкс	2,161	33,668	29,745	8,65	12,19
σ_i , мкс	0,266	12,211	7,663	1,086	1,087
$P_{\max}(i)$	$4,4 \cdot 10^{-15}$	$14 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-11}$	$7,4 \cdot 10^{-15}$	$3,4 \cdot 10^{-13}$

Из табл. 2 видно, что для всех трафиков $T_{\max\text{Sch}} > T_{\max\text{SchSim}}$ ($T_{\max\text{SchSim}}$ — результат компьютерного моделирования), а $P_{\max}$ крайне мало и близко к нулю. $T_{\max\text{Sch}}$, рассчитанное при помощи метода оценки корректности ТР на основе разработанной СМО, является максимальным временем передачи пакетов по расписанию. Поскольку в дальнейшем при вычислении $T_{\max\text{Path}}$ используются худшие оценки ($T_{\max\text{Sch}}$), то $T_{\max\text{Path}}$ не превысит T_{req} . Следовательно, данный метод позволяет вычислять действительно максимальное время передачи пакетов по маршруту в сетях SpaceWire, GigaSpaceWire с временным мультиплексированием на транспортном уровне.

Заключение. В настоящей работе при решении задачи оценивания максимального времени передачи пакетов в сетях авионики на основе сетей SpaceWire, GigaSpaceWire с поддержкой протоколов транспортного уровня при временном мультиплексировании: проведен сравнительный анализ подходов, рассмотрены их недостатки, разработан метод оценки корректности таблиц расписаний согласно показателю максимального времени передачи пакетов по маршруту, проведена серия вычислительных экспериментов, позволяющая удостовериться в возможности применения предложенного метода для рассматриваемой задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышов В. А., Оводенко А. А., Буков В. Н., Шейнин Ю. Е., Шурман В. А., Боблак И. В. Опыт создания технологии проектирования и производства информационно-вычислительной среды для комплексов авиационного бортового оборудования на основе концепций интегрированности, модульности и необслуживаемости // Вестн. академии военных наук. 2012. № 3(40). С. 132—138.
2. Стратегическая программа исследований и разработок, Технологическая платформа „Авиационная мобильность и авиационные технологии“. Ч. 1. 2015. 155 с.
3. Авакян А. А. Унифицированная интерфейсно-вычислительная платформа для систем интегральной модульной авионики // Электронный журнал „Труды МАИ“. 2013. Вып. 65. С. 1—15.
4. Новиков В. М., Платошин Г. А., Шейнин Ю. Е. Особенности применения интерфейса SpaceWire в комплексах бортового оборудования // Труды ГосНИИАС. Вопросы авионики. 2018. Вып. 7(40). С. 41—55.
5. Озеров Е. В., Савченко А. Ю., Кривцов В. А. Сетевые протоколы, применяемые в системах бортового оборудования летательных аппаратов // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки. Сб. докл. VI МНПК „АВИАТОР“. 2019. С. 192—194.
6. Яблоков Е. Н., Шейнин Ю. Е., Суворова Е. А., Солохина Т. В., Глушков А. В., Алексеев И. Н. Гигабитные каналы в сетях SpaceWire // Вопросы радиоэлектроники. 2012. Т. 1, № 2. С. 24—36.
7. Gibson D., Parkes S., McClements C., Mills Gibson S. SpaceWire-D prototype and demonstration system: Networks & protocols, long paper // 2016 Intern. SpaceWire Conf. 2016. P. 298—304.
8. Parkes S., Ferrer A. SpaceNet – SpaceWire-T initial protocol definition (A3.1). Dundee, 2009. 83 p.
9. Freeman R. L. Fundamentals of telecommunications. John Wiley & Sons, Inc., 2013. 704 p.
10. Knudsen P., Madsen J. Integrating communication protocol selection with hardware/software codesign // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 1999. Vol. 18, N 8. P. 1077—1095.
11. Renner F.-M. Automated Communication Synthesis for Architecture-Precise Rapid Prototyping of Real-Time Embedded Systems // Proceedings of the International Workshop on Rapid System Prototyping (RSP-2000). February 2000. P. 154—159. DOI:10.1109/IWRSP.2000.855215.
12. Кудрявцева Е. Н., Росляков А. В. Базовые принципы и перспективы использования теории сетевого исчисления (Network Calculus) // Инфокоммуникационные технологии. 2013. Т. 11, № 3. С. 34—39.
13. Yablokov E. N. Application of queueing theory to the analysis of GigaSpaceWire protocol // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication (WECONF). 2020. P. 9131460.
14. Яблоков Е. Н. Методы исследования и разработки сетевых контроллеров канального уровня для высокоскоростных бортовых вычислительных сетей аппаратов: Автореф. дис. ...канд. техн. наук. СПб, 2018. 140 с.

15. TTEPlan, TTEthernet/AFDX® network planning tool [Электронный ресурс]: <<https://www.tttech.com/products/products/aerospace/development-test-vv/development-tools/tte-plan>>.
16. Буздалов Д. В., Зеленов С. В., Корныхин Е. В., Петренко А. К., Страх А. В., Угненко А. А., Хорошилов А. В. Инструментальные средства проектирования систем интегрированной модульной авионики // Труды Института системного программирования РАН. 2014. Т. 26, № 1. С. 201—230.
17. Jianru H., Xiaomin C., Huixi S. An OPNET Model of SpaceWire and Validation // Proc. 2012 Intern. Conf. on Electronics, Communications and Control. Zhoushan, 2012. P. 792—795.
18. Leeuwen B., Eldridge J., Leemaster J. SpaceWire Model Development Technology for Satellite Architecture // Sandia Report, Sandia National Laboratories. 2011. 30 p.
19. Mirabilis Design, Mirabilis VisualSim data sheet. 2003. 4 p.
20. Leoni A., Nannipieri P., Davalle D. et al. SHINe: Simulator for Satellite on-Board High-Speed Networks Featuring SpaceFibre and SpaceWire Protocols // Aerospace. 2019. Vol. 6, N 4. 43 p.
21. Dellandrea B., Gouin B., Parkes S., Jameux D. MOST: Modeling of SpaceWire & SpaceFibre Traffic-Applications and Operations: On-Board Segment // Proc. of DASIA 2014 Conf. Warsaw, 2014.
22. Schmitt J., Bondorf S., Poe W. Y. The Sensor Network Calculus as Key to the Design of Wireless Sensor Network with Predictable Performance // Sensor and Actuator Networks. 2017. Vol. 6. P. 21—30.
23. Dang D.-H., Ahlem M. Timing Analysis of TDMA-based Networks using Network Calculus and Integer Linear Programming // IEEE 22nd Intern. Symp. on Modelling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems. 2014. P. 21—30.
24. Homomenko A. D., Starobinets D. Y., Lohvitskiy V. A. Model for assessing operational efficiency of the on-board control complex for spacecraft for remote sensing of Earth // St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences. 2016. N 3(46). P. 49—64.
25. Korobkov I. L. Queuing system for the SpaceFibre standard // Proc. of 22th Conf. of FRUCT association. 2018. P. 79—87.
26. Sadowsky J. S., Szpankowski W. Maximum queue length and waiting time revisited. Purdue: Department of computer science, 1991. 17 p.
27. Taylor J. R. An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements University Science Books. 1997. 327 p.

Сведения об авторе

Илья Леонидович Коробков

— магистр; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; соискатель; E-mail: ilya.korobkov.l@gmail.com

Поступила в редакцию 12.11.2021; одобрена после рецензирования 03.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

REFERENCES

1. Chernyshov V.A., Ovodenko A.A., Bykov V.N., Sheynin Y.E., Shurman V.A., Boblak I.V. *Proc. of Academy of Military Sciences*, 2012, no. 3(40), pp. 132—138. (in Russ.)
2. *Strategicheskaya programma issledovaniy i razrabotok, Tekhnologicheskaya platforma "Aviatsionnaya mobil'nost' i aviatsionnyye tekhnologii"* (Strategic Research and Development Program, Technological Platform "Air Mobility and Aviation Technologies"), Pt. 1, 2015, 155 p. (in Russ.)
3. Avakanyan A.A. *Electronic journal "Proceedings of MAI"*, 2013, is. 65, pp. 1—15. (in Russ.)
4. Novikov V.M., Platoshin G.A., Sheynin Y.E. *Proceedings of GosNIIAS. Avionics issues*, 2018, no. 7(40), pp. 41—55. (in Russ.)
5. Ozerov E.V., Savchenko A.Y., Krivtsov V.A. *Aktual'nyye voprosy issledovaniy v avionike: teoriya, obsluzhivaniye, razrabotki* (Actual Research Issues in Avionics: Theory, Maintenance, Development), Proc. of VI ISPC "AVIATOR", 2019, pp. 192—194. (in Russ.)
6. Yablokov E.N., Sheynin Y.E., Suvorova E.A., Solohina T.V., Glushkov A.V., Alekseev I.N. *Questions of Radio Electronics*, 2012, no. 2(1), pp. 24—36. (in Russ.)
7. Gibson D., Parkes S., McClements C., Mills Gibson S. *2016 International SpaceWire Conference*, 2016, pp. 298—304.
8. Parkes S., Ferrer A. *SpaceNet - SpaceWire-T initial protocol definition (A3.1)*, Dundee, 2009, 83 p.
9. Freeman R.L. *Fundamentals of telecommunications*, Wiley, John Wiley & Sons, Inc., 2013, 704 p.
10. Knudsen P., Madsen J. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1999, no. 8(18), pp. 1077—1095.
11. Renner F.-M. *Proceedings of the International Workshop on Rapid System Prototyping*, 2000, pp. 154—159.

- DOI:10.1109/IWRSP.2000.855215.
12. Kudryavtseva E.N., Roslyakov A.V. *Infocommunication technologies*, 2013, no. 3(11), pp. 34–39.
 13. Yablokov E.N. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication*, (WECONF), 2020, p. 9131460.
 14. Yablokov E.N. *Metody issledovaniya i razrabotki setevykh kontrollerov kanal'nogo urovnya dlya vysokoskorostnykh bortovykh vychislitel'nykh setey apparatov* (Research and Development Methods for Network Data Link Controllers for High-Speed On-Board Computer Networks), Extended abstract of candidate's thesis, St. Petersburg, 2018, 140 p. (in Russ.)
 15. *TTEPlan*, TTEthernet/AFDX network planning tool, <https://www.tttech.com/products/products/aerospace/development-test-vv/development-tools/tte-plan>.
 16. Buzdalov D.V., Zelenov S.V., Kornukhin E.V., Petrenko A.K., Strakh A.V., Ugnenko A.A., Khoroshilov A.V. *Proc. of the Institute for System Programming of the RAS*, 2014, no. 1(26), pp. 201–230. (in Russ.)
 17. Jianru H., Xiaomin C., Huixi S. *Proc. 2012 International Conference on Electronics, Communications and Control*, Zhoushan, 2012, pp. 792–795.
 18. Leeuwen B., Eldridge J., Leemaster J. *SpaceWire Model Development Technology for Satellite Architecture*, Sandia Report, Sandia National Laboratories, 2011, 30 p.
 19. *Mirabilis Design, Mirabilis VisualSim data sheet*, 2003, 4 p.
 20. Leoni A., Nannipieri P., Davalle D. et al. *Aerospace*, 2019, no. 4(6), pp. 43.
 21. Dellandrea B., Gouin B., Parkes S., Jameux D. *Proceedings of DASIA 2014 conference*, Warsaw, 2014.
 22. Schmitt J., Bondorf S., Poe W.Y. *Sensor and Actuator Networks*, 2017, vol. 6, pp. 21–30.
 23. Dang D.-H., Ahlem M. *IEEE 22nd International Symposium on Modelling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, 2014, pp. 21–30.
 24. Homonenko A.D., Starobinets D.Yu., Lohvitsky V.A. *Trudy SPIIRAN* (SPIIRAS Proceedings), 2016, no. 3(46), pp. 49–64. (in Russ.)
 25. Korobkov I.L. *Proc. of 22th conference of FRUCT association*, 2018, pp. 79–87.
 26. Sadowsky J.S., Szpankowski W. *Maximum queue length and waiting time revisited*, Purdue, Department of computer science, 1991, 17 p.
 27. Taylor J.R. *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements University Science Book*, 1997, 327 p.

Data on author

Ilya L. Korobkov — MSc; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; PhD Student;
E-mail: ilya.korobkov.l@gmail.com

The article was submitted 12.11.2021; approved after reviewing 03.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.

МЕТОД АДАПТАЦИИ СОСТАВНОГО ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА ТЕЛЕСКОПА

Е. Н. СЕЧАК^{1*}, Н. Ф. ЕРХОВА², А. О. КОЛЕСНИКОВ²

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
* evgenysechak@gmail.com

² Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Аннотация. Теоретически исследованы вопросы позиционирования зеркальных элементов составного главного зеркала телескопа. Рассмотрены критерии качества составного зеркала в зависимости от формы поверхности. Представлен алгоритм адаптации поверхности зеркала (позиционирования сегментов составного зеркала). Предложенная система контроля составного зеркала позволяет контролировать пространственное положение сегментов зеркала и позиционировать их.

Ключевые слова: составное зеркало, сегмент зеркала, адаптивная оптика, критерий качества, оптическая передаточная функция

Ссылка для цитирования: Сечак Е. Н., Ерхова Н. Ф., Колесников А. О. Метод адаптации составного главного зеркала телескопа // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 87—100. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-87-100.

METHOD FOR ADAPTATION OF SEGMENTED PRIMARY TELESCOPE MIRROR

E. N. Sechak¹, N. F. Erkhova², A. O. Kolesnikov²

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia
* evgenysechak@gmail.com

²P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

Abstract. Several issues of positioning of mirror elements of segmented primary telescope mirror are theoretically investigated. Criteria for the quality of segmented mirror depending on its surface shape are considered. An algorithm for mirror surface adaptation (positioning of composite mirror segments) is presented. The proposed control system for composite mirror makes it possible to control the spatial position of the mirror segments and position them.

Keywords: segmented mirror, mirror segment, adaptive optics, quality criteria, modulation transfer function

For citation: Sechak E. N., Erkhova N. F., Kolesnikov A. O. Method for adaptation of segmented primary telescope mirror. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 2. P. 87—100 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-87-100.

Космические наблюдательные комплексы в основном базируются на оптических системах, что обусловлено возможностью решения многих научно-технических задач при лучших выходных характеристиках оптико-механических устройств. К этим характеристикам относятся, прежде всего, разрешение и массогабаритные параметры аппаратуры. Однако постепенное повышение требований научной и прикладной практики к разрешению, а также проница-

тельной способности (проницающей силе) привело к тому, что оптические системы, изготавливаемые по классическим схемам с использованием современных технологий, подходят к пределу по массогабаритным параметрам. Особенно это относится к наземным астрономическим инструментам [1—4].

В связи с этим в странах, имеющих научные программы, связанные с телескопостроением, ведутся интенсивные поиски путей увеличения входных зрачков объективов телескопов при минимизации увеличения их массы. Первое и очевидное направление поиска — применение новых материалов для корпусов зеркал с высокими механическими характеристиками (металлы, сплавы, композиты) и обеспечение высоких прочностных характеристик конструкций при максимально возможном облегчении. Второе направление — переход к использованию зеркально облегченной оптики с управляемой поверхностью, причем в этой области работы ведутся и над созданием сверхтонких зеркальных элементов, локально изгибаемых с помощью множества приводов, размещаемых с тыльной стороны, и над созданием зеркал, состоящих из относительно небольших жестких элементов, управляемых по положению с помощью приводов для получения и удержания единой оптической поверхности. Наконец, третье направление — переход к нетрадиционным оптическим схемам, основанным на принципах апертурного синтеза, когда общее изображение получается как сумма сфазированных изображений, формируемых несколькими телескопами умеренного размера с жесткими зеркалами.

В настоящей работе представлены исследования в области позиционирования зеркальных сегментов телескопа с составным главным зеркалом.

Существующий уровень развития техники позволяет вывести на орбиту телескопы с диаметром зеркала до 3 м в собранном виде с учетом габаритов конструкции космического аппарата и реализовать теоретическое разрешение, определяемое только диаметром апертуры и рабочей длиной волны (0,05" для телескопа, предназначенного для исследований в видимой части спектра) [5]. Из вышесказанного возникают требования по температурной стабильности и достаточной механической жесткости для обеспечения заданных показателей критерия качества: в частности, среднеквадратичное отклонение волнового фронта, отраженного от зеркала, должно быть менее $0,03\lambda$ (при $\lambda=633,2$ нм) [5].

Оценка прогиба сплошных зеркал, изготовленных из одного и того же материала, показывает, что при единых конструктивных подходах величина деформации прямо пропорциональна четвертой степени их наружного диаметра и обратно пропорциональна второй степени их толщины (если удвоить диаметр зеркала, то для получения той же деформации под действием сил собственного веса необходимо в четыре раза увеличить его толщину, а масса зеркала при этом увеличится в шестнадцать раз [3—5]). Из этого примера ясно, что увеличение диаметра зеркала сопряжено со значительным увеличением его массы, и следовательно, массы всего телескопа. Для космического телескопа такой подход неприемлем. Нужно суметь облегчить конструкцию главного зеркала и при этом получить высокое качество его поверхности при изготовлении на Земле и сохранении его в условиях невесомости.

Использование составных сегментированных зеркал позволяет удовлетворить все основные требования, предъявляемые к конструкции крупногабаритного зеркала как космического, так и наземного базирования. Во-первых, открывается возможность дальнейшего снижения веса зеркала за счет структуры облегчения сегментов. С увеличением размеров при таком отношении диаметра зеркала к толщине вес его будет уменьшаться пропорционально корню квадратному из числа сегментов зеркала. Во-вторых, обеспечивается требуемая жесткость зеркала (так как жесткость одного элемента будет эквивалентна жесткости всех элементов составного зеркала). В-третьих, температурная стабильность составного зеркала по площади всех сегментов становится выше. В-четвертых, достигается необходимое качество изображения телескопической системы в целом за счет коррекции формы поверхности зеркала с допусками, обеспечивающими дифракционный предел оптической системы. В этом слу-

чае требования высокой точности обработки предъявляются к отдельным элементам зеркала сравнительно небольшого размера, а точность установки достигается за счет применения алгоритма адаптации. Возможный вариант построения алгоритма позиционирования сегментов составного зеркала представлен в настоящей работе.

Выбор формы зеркальных сегментов составного зеркала. При выборе формы элементов в случае применения составных зеркал целесообразно исследовать варианты, представленные на рис. 1. В частности, с точки зрения заполнения полной апертуры зеркала больший интерес представляют зеркала с шестиугольной формой сегмента [6].

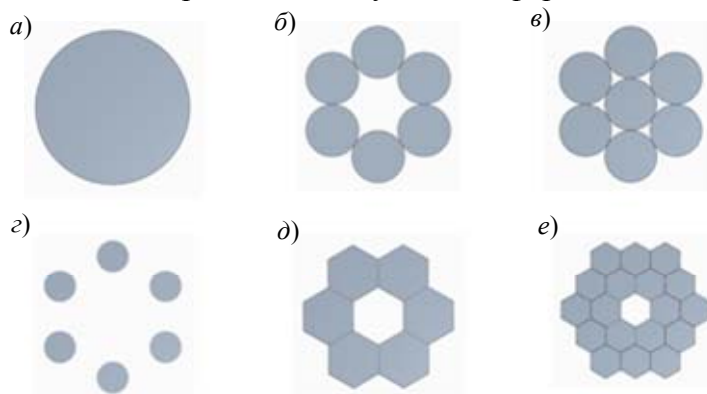


Рис. 1

Количество элементов, и следовательно их размеры, в основном ограничиваются допустимым числом каналов системы управления, определяющих ее сложность, массу, стабильность, надежность и другие свойства [7].

Была исследована зависимость контрастности от среднеквадратического отклонения формы зеркал $W_{\text{скв}}$ для мало- и многоэлементных составных зеркал (см. таблицу). Также были оценены поперечное смещение центра изображения a_{yz} и максимальный угол наклона сегмента при заданном максимальном отклонении формы зеркала ΔW_{max} [8].

Многоэлементное составное зеркало (рис. 1, e) в исследуемом случае имеет два кольца сегментов зеркал, в отличие от малоэлементных (рис. 1, a—d), имеющих только одно кольцо, что приводит к изменению поперечного смещения центра изображения.

Зависимость контрастности от среднеквадратического отклонения формы зеркал

$W_{\text{скв}}$	Малоэлементные		Многоэлементные		Угол наклона сегмента, °	Контраст
	ΔW_{max}	a_{yz} , %	ΔW_{max}	a_{yz} , %		
0	0	0	0	0	0	1
$\lambda/50$	$\lambda/25$	1,6	$\lambda/10$	4,1	$1,96 \cdot 10^{-5}$	0,98
$\lambda/20$	$\lambda/10$	4,1	$\lambda/4$	10,2	$2,87 \cdot 10^{-5}$	0,9
$\lambda/14$	$\lambda/7$	5,8	$\lambda/2,8$	14,6	$6,86 \cdot 10^{-5}$	0,8
$\lambda/10$	$\lambda/5$	8,2	$\lambda/2$	20,5	$9,77 \cdot 10^{-5}$	0,6
$\lambda/8$	$\lambda/4$	10,2	$\lambda/1,6$	25,6	$1,22 \cdot 10^{-4}$	0,4

Форма и количество сегментов зеркала оказывают существенное влияние на качество изображения, в том числе на частотно-контрастную характеристику (ЧКХ), графики которой приведены на рис. 2 (части a—e рисунка соответствуют частям рис. 1, где 1 — меридиональное сечение, 2 — сагиттальное сечение). В случае малоэлементных зеркал с круглой формой сегмента происходит быстрое падение ЧКХ в сагиттальном сечении. В случае малоэлементного зеркала с шестиугольной формой сегмента нет существенной разницы между ЧКХ для сагиттального и меридионального сечений, однако происходит быстрое падение контраста для обоих сечений. Таким образом, было выбрано многоэлементное зеркало с гексагональной формой сегмента. Во избежание влияния зазоров между элементами составного зеркала на качество изображения величина зазора не должна превышать 1 % от общей площади зеркала [9].

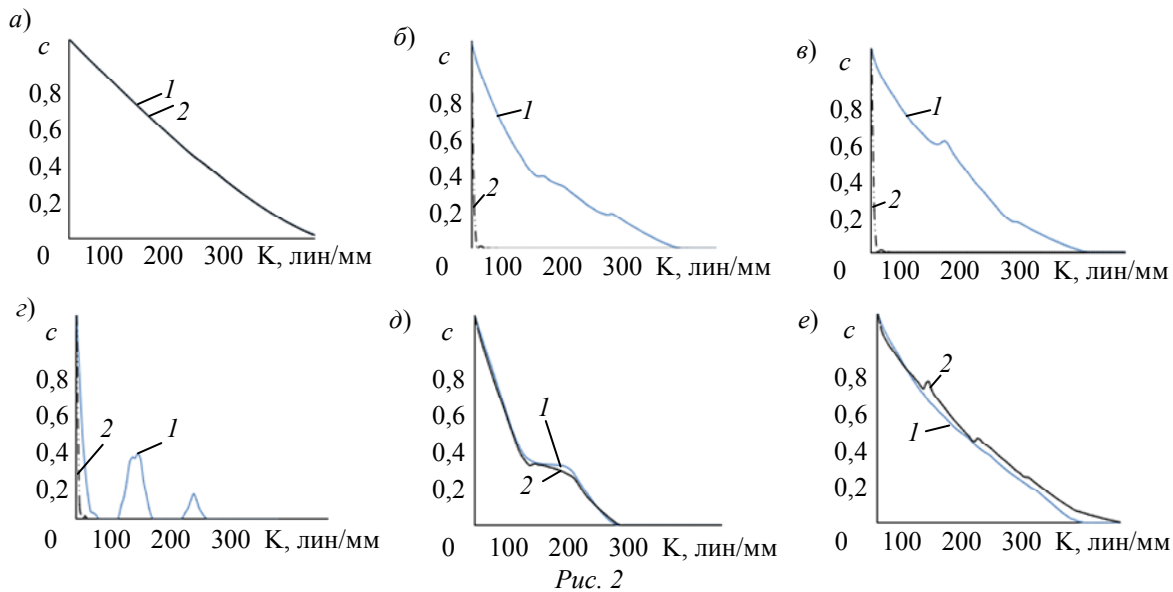


Рис. 2

Для дальнейшего исследования были выбраны сегменты составного зеркала шестиугольной формы, так как потеря энергии излучения из-за зазоров не превышает 1 % по отношению к цельному зеркалу и не вызывает существенной разницы для разрешающей способности в меридиональном и сагиттальном сечениях. Далее для составления алгоритма позиционирования составного зеркала рассчитаем координаты центров сегментов составного зеркала.

Примем сторону составного гексагонального зеркала для расчета равной a_6 (рис. 3, а) и введем радиус описанной R_6 и вписанной окружностей r_6 (рис. 3, б).

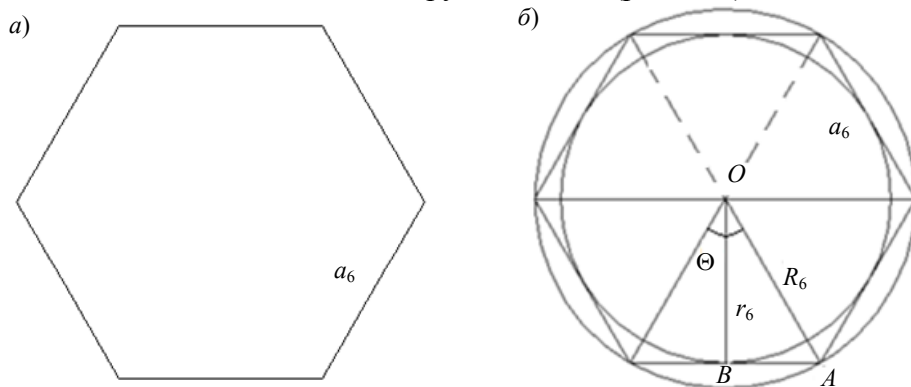


Рис. 3

Угол при вершине каждого из шести равнобедренных треугольников (рис. 3, б) равен $\Theta = \frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$.

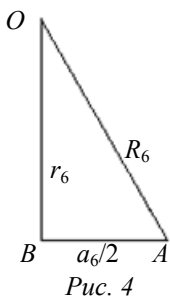


Рис. 4

Выделим из равнобедренного треугольника прямоугольный треугольник OAB (рис. 4).

Угол AOB равен $\alpha = \frac{60^\circ}{2} = 30^\circ$, катет OB является высотой равностороннего треугольника, вписанного в шестиугольник в соответствии с рис. 3, б, поэтому угол OBA равен 90° , тогда угол BAO : $\beta = 180^\circ - (90^\circ + 30^\circ) = 60^\circ$. По теореме Пифагора найдем радиус вписанной окружности:

$$r_6 = \sqrt{R_6^2 - \left(\frac{a_6}{2}\right)^2}.$$

Вычислим радиус описанной окружности:

$$\frac{a_6}{2} = R_6 \cdot \sin \alpha \Rightarrow R_6 = \frac{a_6}{2 \sin \alpha} = \frac{a_6}{2 \sin 30^\circ} = \frac{a_6}{2(1/2)} = a_6, \quad (2)$$

зависимость между радиусами описанной и вписанной окружностей имеет вид:

$$r_6 = R_6 \cdot \cos \alpha \Rightarrow r_6 = R_6 \cos 30^\circ = R_6 \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (3)$$

Для того чтобы иметь возможность управлять каждым сегментом зеркала, необходимо знать координаты центров этих сегментов, поэтому введем три concentric окружности (рис. 5), что позволит вычислить координаты центров каждого из сегментов в заданном секторе составного зеркала в трехмерном пространстве [10, 11].

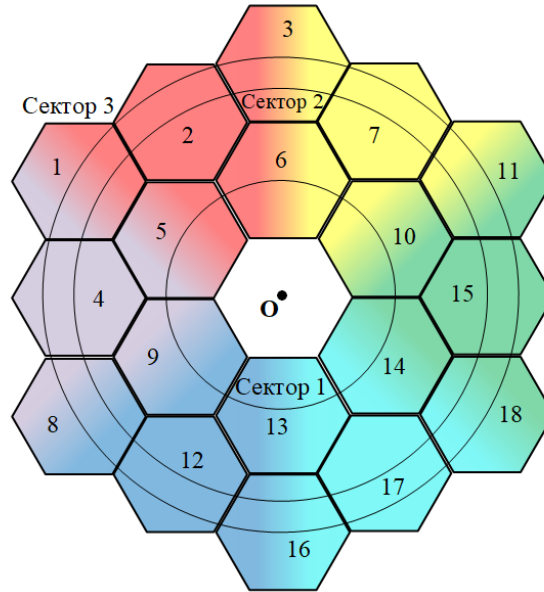
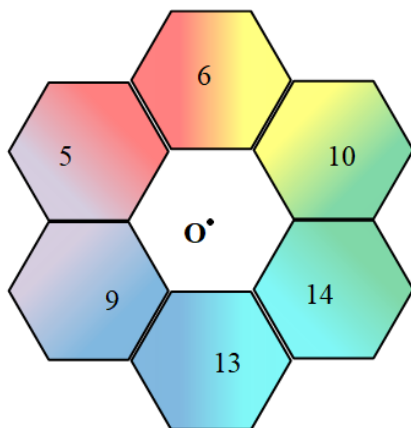


Рис. 5

На рис. 6, а приведены сегменты зеркала, находящиеся в первом круговом секторе (5, 6, 9, 10, 13, 14).

а)



б)

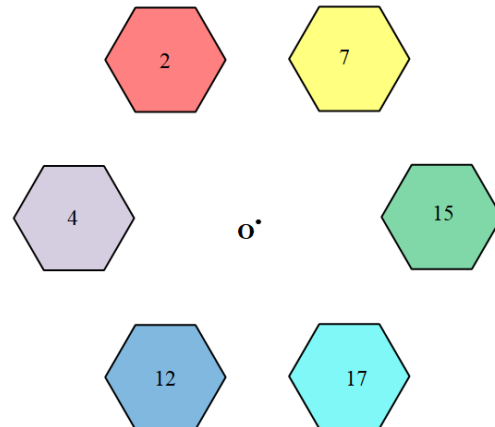


Рис. 6

Используем выражение для нахождения центров сегментов [12]:

$$\begin{cases} x = 2g \cos \alpha \cos \phi, \\ y = 2g \cos \alpha \sin \phi, \\ z = 2g \sin \alpha. \end{cases} \quad (4)$$

Исходя из значений параметров, полученных в соответствии с рис. 3, б и 4, вычислим координаты центров сегментов согласно выражению (4):

$$\begin{cases} x = 2R \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right) \cos \left(\arcsin \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right) \right) \cos \phi, \\ y = 2R \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right) \cos \left(\arcsin \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right) \right) \sin \phi, \\ z = \sqrt{\left(2R \frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right)^2 \left(1 - \cos^2 \left(\arcsin \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right) \right) \right)}. \end{cases} \quad (5)$$

Рассмотрим круг № 2 (рис. 6, б), в который укладываются сегменты 2, 4, 7, 12, 15, 17. Углы между центрами сегментов также составляют $\alpha = 60^\circ$, т.е. (120, 60, 0, 300, 240, 180°).

Для отыскания координат сегмента, расположенного во втором секторе, покажем проекцию на плоскость XOZ (рис. 7, а) и вычислим угол отклонения центра сегмента № 2 от вертикали в соответствии с рис. 7, б. Тогда координаты центров сегментов во втором секторе будут находиться из следующего выражения:

$$\begin{cases} x = 2d \cos \rho \cos \phi, \\ y = 2d \cos \rho \sin \phi, \\ z = 2d \sin \rho. \end{cases} \quad (6)$$

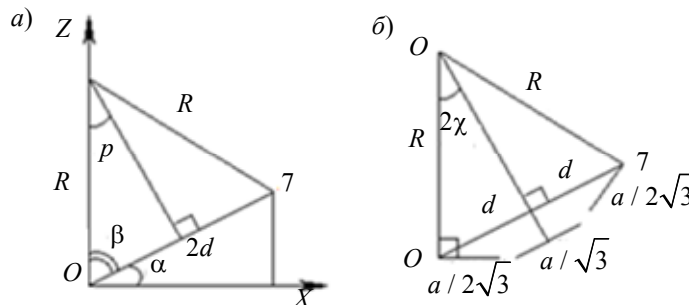


Рис. 7

Из рис. 7, а сторона $d = R \cdot \sin \rho$ и угол $\alpha = 90^\circ - \beta = 90^\circ - (180^\circ - 90^\circ - \rho) = \rho$, а из 7, б

сторона $d = R \sin(1,5\chi)$, угол $\chi = \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right)$. ϕ — угол до центра каждого из

сегментов в плоскости XOY , т.е. $\phi_8 = 120^\circ$, $\phi_{10} = 60^\circ$, $\phi_{12} = 0$, $\phi_{14} = 300^\circ$, $\phi_{16} = 240^\circ$, $\phi_{18} = 180^\circ$. Из приведенных на рисунках треугольников выведем соотношение для ρ :

$$\begin{cases} \rho = (1,5\chi) \\ d = R \sin \rho \end{cases} \Rightarrow \rho = 2 \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right). \quad (7)$$

Введем выражение для нахождения координат центров сегментов:

$$\begin{cases} x = 2d \cos \rho \cos \phi = 2R \sin(1,5\chi) \cos \rho \cos \phi, \\ y = 2d \cos \rho \sin \phi = 2R \sin(1,5\chi) \cos \rho \sin \phi, \\ z = 2d \sin \rho = 2R \sin(1,5\chi) \sin \rho. \end{cases} \quad (8)$$

Используя значения параметров, полученных в соответствии с рис. 7, вычислим координаты центров сегментов в соответствии с выражением (8):

$$\begin{cases} x = 2R \sin \left(1,5 \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right) \right) \cos \left(1,5 \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right) \right) \cos \phi, \\ y = 2R \sin \left(1,5 \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right) \right) \cos \left(1,5 \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right) \right) \sin \phi, \\ z = 2R \sin \left(1,5 \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right) \right) \sin \left(1,5 \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right) \right). \end{cases} \quad (9)$$

Рассмотрим круг № 3 (рис. 8), в который укладываются сегменты 1, 3, 8, 11, 16, 18. Углы между центрами сегментов также составляют $\alpha = 60^\circ$, т.е. $(90, 30, 330, 270, 210, 150^\circ)$.

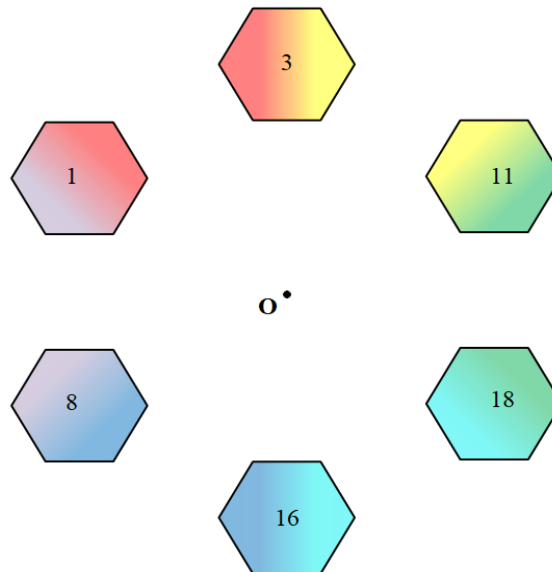


Рис. 8

Для отыскания координат каждого сегмента в трехмерной декартовой системе необходимо рассмотреть рис. 9, а; из рис. 9, б можно определить угол отклонения центра сегмента № 3 от вертикали. В результате расчетов будем иметь следующие выражения для нахождения координат центров сегментов третьего круга.

Для отыскания координат сегмента, расположенного в третьем секторе, покажем проекцию на плоскость XOZ (рис. 9, а) и вычислим угол отклонения центра сегмента № 2 от вертикали в соответствии с рис. 9, б. Тогда координаты центров сегментов во втором секторе будут находиться из следующего выражения:

$$\begin{cases} x = 2f \cos(2\gamma) \cos \phi, \\ y = 2f \cos(2\gamma) \sin \phi, \\ z = 2f \sin(2\gamma). \end{cases} \quad (10)$$

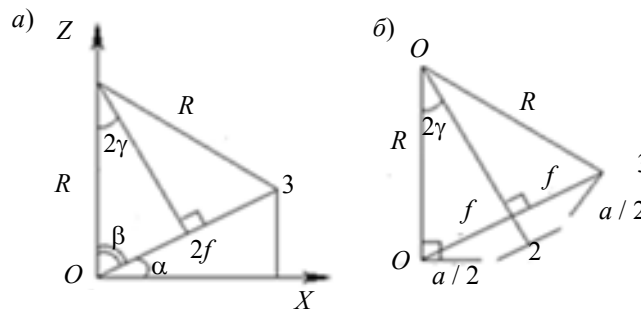


Рис. 9

Согласно рис. 9, а, проекция на горизонтальную плоскость выражается соотношением $2f \cos(2\gamma)$ и угол $\alpha = 90^\circ - \beta = 90^\circ - (180^\circ - 90^\circ - 2\gamma) = 2\gamma$, а из рис. 9, б сторона $f = R \sin(2\gamma)$,

угол $\gamma = \arcsin \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right)$. ϕ — угол до центра каждого из сегментов в плоскости XOY ,

т.е. $\phi_9 = 90^\circ$, $\phi_{11} = 30^\circ$, $\phi_{13} = 330^\circ$, $\phi_{15} = 270^\circ$, $\phi_{17} = 210^\circ$, $\phi_{19} = 150^\circ$. Из приведенных на рисунках треугольников выведем соотношение для угла 2γ :

$$2\gamma = 2 \arcsin \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right). \quad (11)$$

Используя значения параметров, полученных согласно рис. 9, вычислим координаты центров сегментов в соответствии с выражением (10):

$$\begin{cases} x = 2R \sin(2\gamma) \cos(2\gamma) \cos \phi = 2R \sin \left(2 \arcsin \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right) \right) \cos \left(2 \arcsin \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right) \right) \cos \phi, \\ y = 2R \sin(2\gamma) \cos(2\gamma) \sin \phi = 2R \sin \left(2 \arcsin \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right) \right) \cos \left(2 \arcsin \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right) \right) \sin \phi, \\ z = 2R \sin(2\gamma) \sin(2\gamma) = 2R \sin^2 \left(2 \arcsin \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right) \right). \end{cases} \quad (12)$$

Зная координаты центров сегментов, диаметр и фокусное расстояние составного зеркала, можно составить алгоритм позиционирования сегментов составного зеркала.

Способ контроля оптической поверхности составного зеркала. В поле зрения приемника неотъюстированного составного зеркала будет находиться множество изображений точечного источника, создаваемых каждым сегментом зеркала по отдельности. Некоторые сегменты могут строить изображение вне поля зрения камеры. На первом этапе юстировки системы сопоставляются сегменты и изображения источника излучения на детекторе. По очереди (или по нескольку одновременно, но по разным шаблонам) все зеркала „шевелиются“ актуаторами. Зафиксированное изображение приводится к центру поля зрения. Если зафиксировать перемещение ни одного из изображений не удастся, значит, изображение сегмента находится вне поля зрения детектора. Для поиска актуаторы наклоняют сегмент таким образом, чтобы изо-

бражение начало двигаться по расширяющейся спирали. Сканирование продолжается, пока изображение не будет найдено, после чего оно также перемещается в центр поля зрения.

Оптимизация положения сегментов. После того как положения пятен от каждого сегмента зеркала по отдельности совпадут с требуемыми координатами на детекторе, необходимо произвести окончательную юстировку сегментов. Для этого апертура зеркала разбивается на круглые сектора, каждый из которых включает в себя пять примыкающих друг к другу сегментов (рис. 10). Сегменты зеркала, находящиеся на пересечении соседних секторов, принадлежат каждому из этих секторов. Далее открывается один сектор и вычисляются функция рассеяния точки (ФРТ) и оптическая передаточная функция (ОПФ) для идеально отъюстированных сегментов данного сектора и текущего их положения. В качестве минимизируемого при оптимизации функционала рассматривается следующая величина:

$$F = \sum_{i,j} \left| \text{ОПФ}_{i,jT} - \text{ОПФ}_{i,jЦ} \right|^2, \quad (13)$$

где $\text{ОПФ}_{i,jT}$ — текущее, а $\text{ОПФ}_{i,jЦ}$ — целевое значение комплексной амплитуды i,j -й пространственной частоты.

При оптимизации следует пользоваться перестраиваемым источником излучения со спектральным диапазоном шириной не менее октавы. Сначала функционал минимизируется для наибольшей длины волны, затем длина волны постепенно уменьшается, что позволяет выявить смещения сегментов вдоль оптической оси, кратные половине длины волны, и компенсировать их. Пусть, для примера, есть два сегмента, смещенные друг относительно друга на расстояние $m\lambda_0/2$ вдоль оптической оси. Тогда в фокусе будет происходить интерференция полей, отраженных от этих двух сегментов пучков, которая в зависимости от длины волны λ перестраиваемого лазера будет приводить то к максимуму, то к минимуму в фокальном пятне:

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 \approx E_1 \left(\exp\left(\frac{2\pi i l}{\lambda}\right) + \exp\left(\frac{2\pi i (l + m\lambda_0)}{\lambda}\right) \right) = \\ &= E_1 \exp\left(\frac{2\pi i \left(l + m\frac{\lambda_0}{2}\right)}{\lambda}\right) \left(\exp\left(-\frac{\pi m i \lambda_0}{\lambda}\right) + \exp\left(\frac{\pi m i \lambda_0}{\lambda}\right) \right) \sim \cos\left(\frac{\pi m \lambda_0}{\lambda}\right). \end{aligned} \quad (14)$$

Поэтому, если сегменты смещены вдоль оптической оси, при перестройке длины волны интенсивность в фокусе будет осциллировать как сумма по сегментам k от $\cos(\text{const}_k/\lambda + \varphi_k)$, и внешний вид ФРТ и ОПФ будет качественно меняться при перестроении длины волны. Когда все сегменты формируют единую поверхность, ФРТ и ОПФ будут сохранять свою форму, изменяя лишь свои размеры, интенсивность в фокусе при этом будет изменяться, без осцилляций [13—15].

После того как длина волны уменьшилась до минимального значения, ее увеличивают чуть более чем в два раза, после чего снова плавно уменьшают до минимума, производя на каждом промежуточном значении оптимизацию положения сегментов. При более чем двукратном увеличении длины волны смещение сегмента вдоль оптической оси в терминах числа полуволн уменьшится вдвое. Оптимизация положения сегментов проводится методом по координатного спуска или симплекс-методом и завершается, если функционал не превосходит заданное значение ε . После того как функционал текущего сектора приведен к минимуму, сегменты данного сектора закрываются диафрагмой и открываются сегменты следующего сектора. Два из этих сегментов (входящие в состав предыдущего сектора) уже были выставлены с необходимой точностью, поэтому оптимизация будет затрагивать только положение трех других сегментов сектора. При открытии последнего сектора все сегменты в нем, кроме одного, уже должны формировать единую поверхность зеркала. С выставлением этого сегмента процесс оптимизации завершается [14, 15].

Для примера была произведена численная оптимизация сегментов сектора 1 для сферического зеркала с радиусом кривизны 20 м со стороны шестиугольного сегмента 1 м. Начальные углы отклонения зеркал были такими, чтобы центр светового пятна каждого из сегментов попадал в первый дифракционный максимум первого сектора. Относительный сдвиг сегментов вдоль оптической оси был задан в пределах 5 мкм.

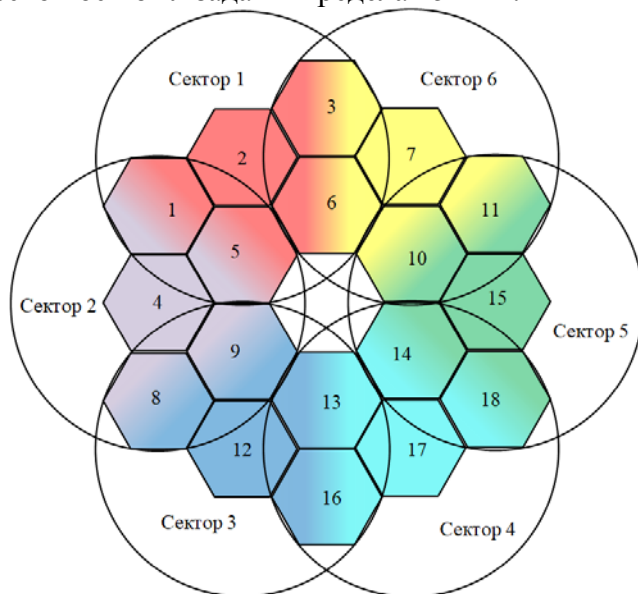


Рис. 10

На рис. 11 приведены ФРТ и ОПФ для случая, когда все сегменты первого сектора этого зеркала находятся в идеальном положении. Левый столбец — ФРТ, сверху линейный, снизу — логарифмический масштаб); в среднем столбце — амплитуда ОПФ–ЧКХ (сверху линейный, снизу — логарифмический масштаб); в правом столбце — фаза ОПФ–ЧФХ. На рис. 12 построены ФРТ и ОПФ для начального (до оптимизации) положения сегментов составного зеркала (обозначения соответствуют рис. 11), а на рис. 13 — разности для начального и идеального положения сегментов первого сектора. Левый столбец — разность ФРТ (сверху в линейном, снизу — в логарифмическом масштабе); средний столбец — модуль разности ОПФ (сверху в линейном, снизу — в логарифмическом масштабе); правый столбец — фаза разности ОПФ. Все графики на рис. 11—13 рассчитаны для длины волны $\lambda = 532$ нм.

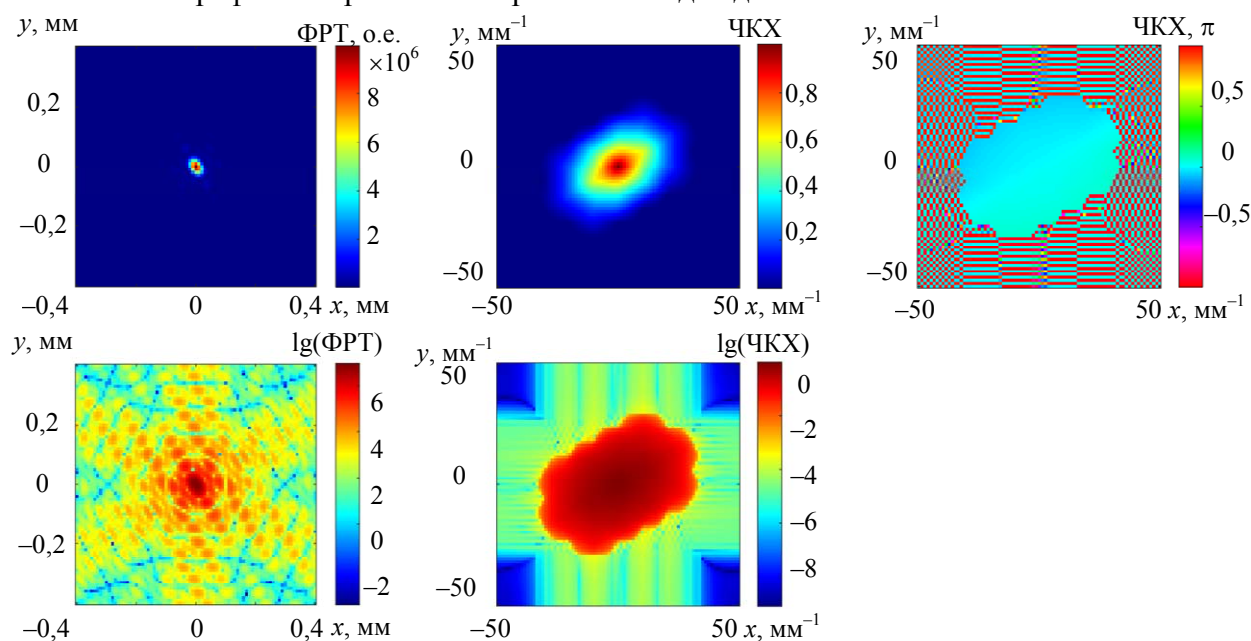


Рис. 11

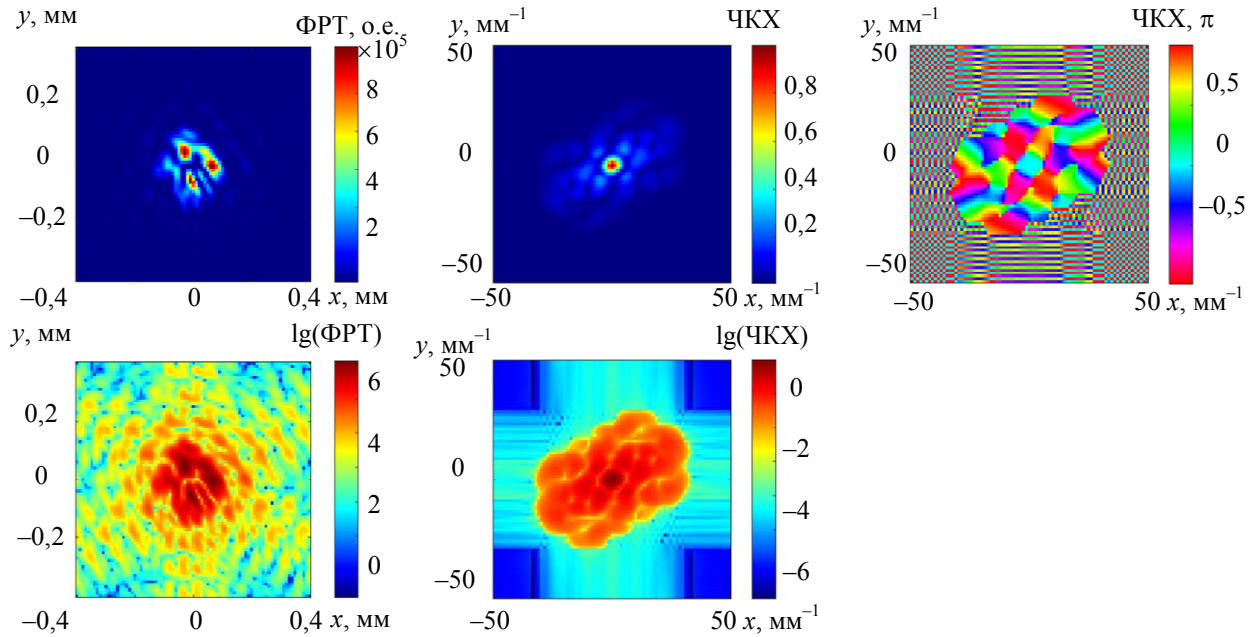


Рис. 12

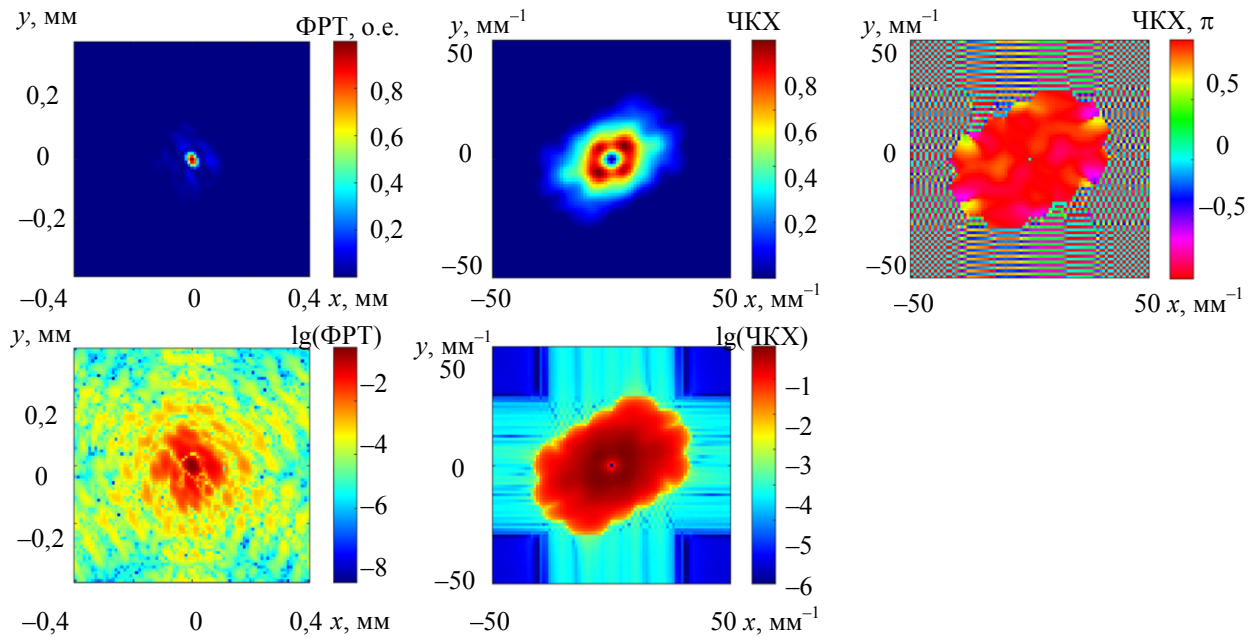


Рис. 13

В начале оптимизации была взята длина волны 1100 нм. Углы поворота сегментов зеркала были зафиксированы, менялись только смещения сегментов 1, 2, 3 и 5 вдоль оптической оси зеркала. Поскольку фокальная перетяжка зеркала достаточно велика по сравнению с длиной волны, смещение шестого сегмента вдоль оптической оси можно считать идеальным, а все остальные сегменты выставить относительно него так, чтобы в итоге все они формировали единую сферическую поверхность. При первых итерациях оптимизации сегменты 1, 2, 3, 5 и 6 выстроились так, что разность их положения вдоль оптической оси относительно идеального с большой точностью составила целое число полуволн. После этого была произведена оптимизация углов наклона всех этих сегментов, пока функционал не составил менее $5 \cdot 10^{-3}$. Углы были зафиксированы и не изменялись. Была взята меньшая длина волны $\lambda = 1060$ нм, и на ней оптимизирован сдвиг сегментов вдоль оптической оси. Далее длина волны в процессе оптимизации постепенно уменьшалась до 532 нм, смещения сегментов вдоль оптической оси при этом составляли одно и то же число полуволн и тоже уменьшались в абсолютном значении.

После оптимизации на 532 нм длина волны снова принимала значение 1100 нм. При этом смещение сегментов вдоль оси зеркала в абсолютном значении практически не менялось, но в два раза уменьшалось число полуволн, соответствующее ему. Таким образом, повторение оптимизации с постепенным уменьшением длины, за которым следует возвращение длины волны в максимальное положение, позволяет сгруппировать сегменты зеркала так, чтобы их смещения вдоль оптической оси отличались от идеального на величину много меньшую, чем половина длины волны. При таком расположении сегментов зеркала ОПФ и ФРТ при перестройке длины волны будут сохранять свою форму. После этого на длине волны 532 нм была произведена финальная оптимизация углов наклона сегментов первого сектора зеркала. Алгоритм позиционирования сегментов зеркала представлен на рис. 14.

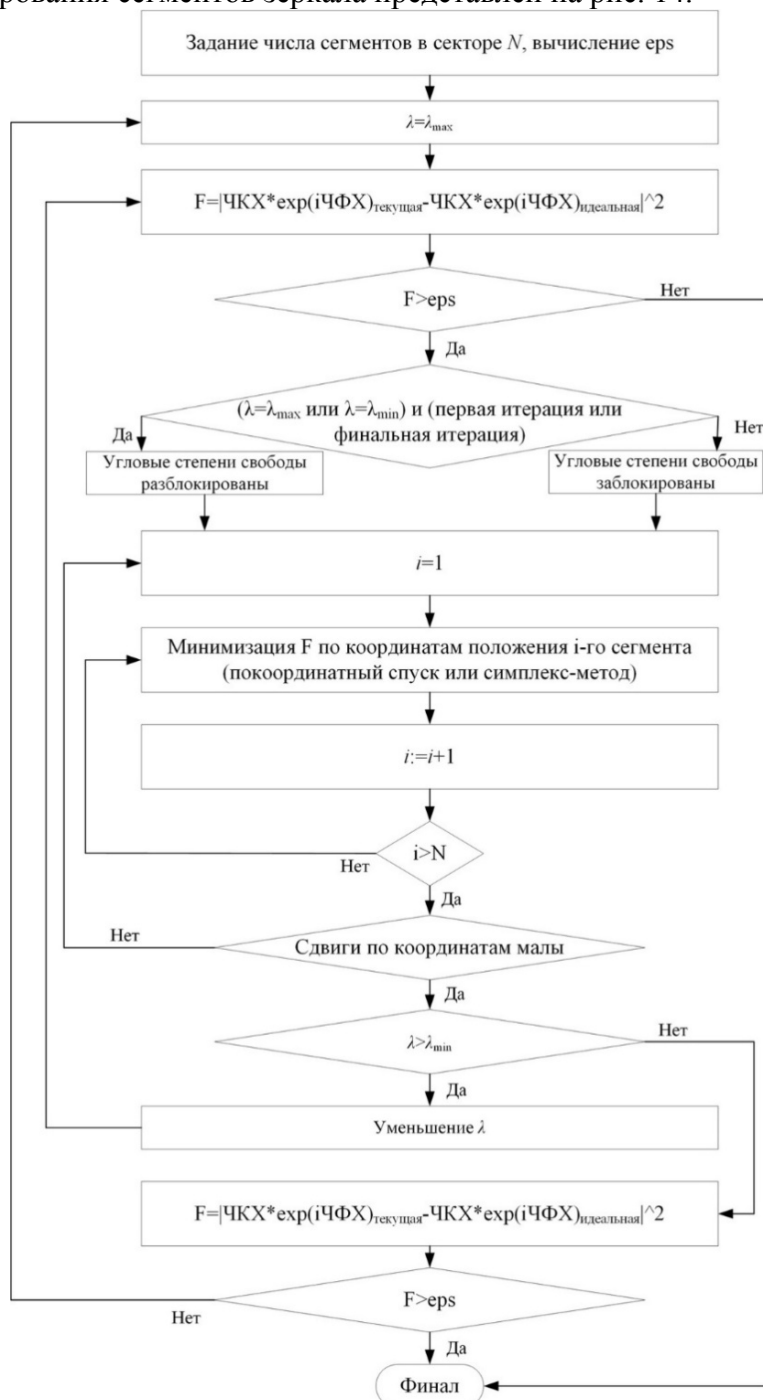


Рис. 14

Вид разностей ФРТ и ОПФ после оптимизации, а также зависимость функционала от номера итерации оптимизации приведены на рис. 15 (правый нижний график отражает поведение функционала в процессе оптимизации. Участки, на которых график убывает, соответствуют оптимизации на фиксированной длине волны, а резкие скачки функционала вверх — изменению длины волны).

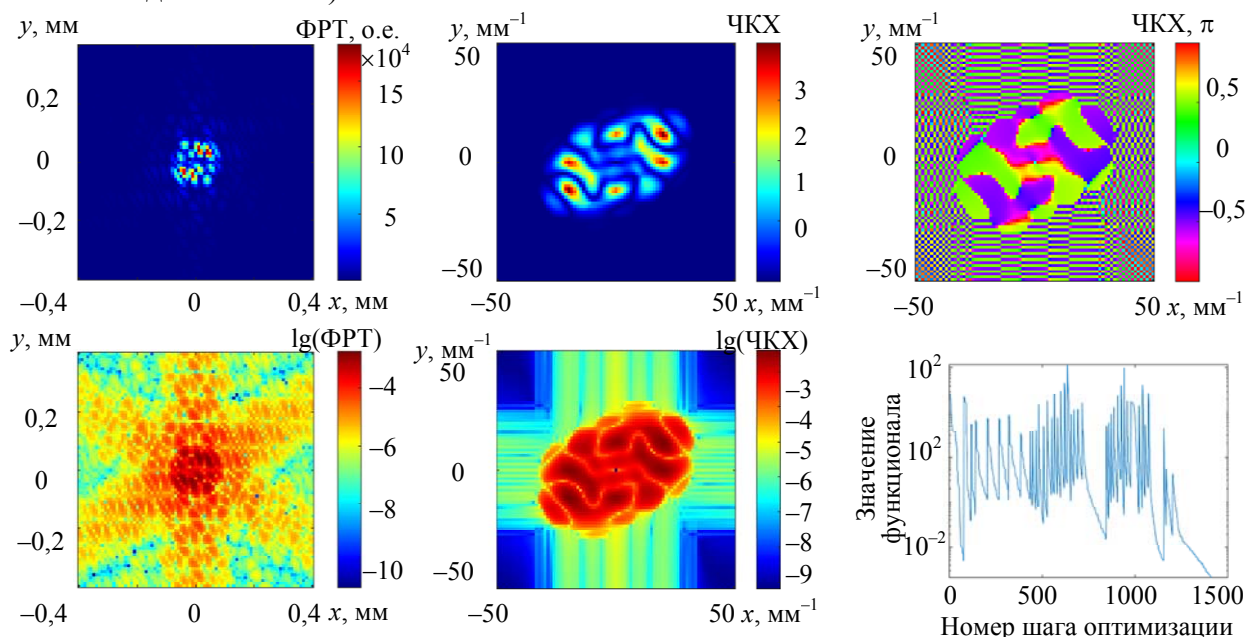


Рис. 15

Заключение. Предложенная система контроля составного зеркала позволяет контролировать пространственное положение сегментов зеркала и позиционировать их. Аналитические расчеты показывают, что функционал выражения (13) позволяет обнаруживать сдвиг сегмента зеркала вдоль оптической оси (на 532 нм) с точностью до $\lambda/25$ и его угловое отклонение — с погрешностью до 10^{-5° (определены из условия, что максимум — по частотам — разности ОПФ_ц и ОПФ_т составляет не более 1 % от максимума ОПФ_ц), что и определяет точность данного метода. Проведение оптимизации показало, что разброс сдвигов сегментов вдоль оптической оси составил 20 нм при диапазоне перестройки λ от 1100 до 532 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаева Е. В., Зверев В. А., Филатов А. А. Адаптивная оптика. СПб: НИУ ИТМО, 2012. 297 с.
2. Дворкин Б. А., Дудкин С. А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли // Геоматика. 2013. № 2. С. 16—38.
3. Сычев В. В. К вопросу об эффективности крупногабаритных оптических телескопов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 1. С. 101—113.
4. Бакланов А. И. Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2010. № 2. С. 80—91.
5. Маламед Е. Р. Конструирование оптических приборов космического базирования. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. 291 с.
6. Шанин О. И. Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. М.: Техносфера, 2013. 296 с.
7. Тербиж В. Ю. Современные оптические телескопы. М.: Физматлит, 2005. 65 с.
8. Аванесов Г. А. Исследование и компенсация измерения координат звезд датчиков ориентации при летной эксплуатации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 1. С. 68—79.

9. Лукин В. П. Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // УФН. 2014. Т. 184, № 6. С. 599—640.
10. Александров П. С. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. М.: Наука, 2009. 512 с.
11. Беклемисhev Д. В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. М.: Наука, 2015. 445 с.
12. Рабыш А. Ю., Демин А. В. Алгоритм компоновки составных объектов (на примере зеркала) // Научно-технический вестник СПб НИУ ИТМО. 2008. № 58. С. 31—36.
13. Абрамочкин Е. Г., Волостников В. Г. Современная оптика гауссовых пучков. М.: Физматлит, 2010. С. 180—184.
14. Иванова А. В. Компьютерные методы оптимизации оптических систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. 114 с.
15. Иванова Т. В., Вознесенская А. О. Введение в прикладную и компьютерную оптику. Конспект лекций. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 99 с.

Сведения об авторах

- Евгений Николаевич Сечак** — аспирант; Университет ИТМО, Инженерно-исследовательский факультет; E-mail: evgenysechak@gmail.com
- Наталья Феликсовна Ерхова** — Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, лаборатория „Астрофизика высокого разрешения“; мл. научный сотрудник; E-mail: erhovanf@lebedev.ru
- Алексей Олегович Колесников** — Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Отдел спектроскопии отделения оптики; мл. научный сотрудник; E-mail: kolesnikovao@lebedev.ru

Поступила в редакцию 24.09.2021; одобрена после рецензирования 26.10.2021; принята к публикации 30.12.2021.

REFERENCES

1. Ermolaeva E.V., Zverev V.A., Filatov A.A. *Adaptivnaya optika* (Adaptive Optics), St. Petersburg, 2012, 297 p. (in Russ.)
2. Dvorkin B.A., Dudkin S.A. *Geomatics*, 2013, no. 2, pp. 16–38. (in Russ.)
3. Sychev V.V. *Science and Education of Bauman MSTU*, 2015, no. 1, pp. 101–113. (in Russ.)
4. Baklanov A.I. *Vestnik of the Samara State Aerospace University (Vestnik SSAU)*, 2010, no. 2, pp. 80–91. (in Russ.)
5. Malamed E.R. *Konstruirovaniye opticheskikh priborov kosmicheskogo bazirovaniya* (Design of Space-Based Optical Instruments), St. Petersburg, 2002, 291 p. (in Russ.)
6. Shanin O.I. *Adaptivnyye opticheskiye sistemy korrektsii naklonov. Rezonansnaya adaptivnaya optika* (Adaptive Optical Systems for Tilt Correction. Resonance Adaptive Optics), Moscow, 2013, 296 p. (in Russ.)
7. Terebizh V.Yu. *Sovremennyye opticheskiye teleskopy* (Modern Optical Telescopes), Moscow, 2005, 65 p. (in Russ.)
8. Avanesov G.A. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, no. 1(17), pp. 68–79.
9. Lukin V.P. *Physics-USpekhi*, 2014, no. 6(57), pp. 556–592.
10. Aleksandrov P.S. *Kurs analiticheskoy geometrii i lineynoy algebry* (Course in Analytic Geometry and Linear Algebra), Moscow, 2009, 512 p. (in Russ.)
11. Beklemishev D.V. *Kurs analiticheskoy geometrii i lineynoy algebry* (Course in Analytic Geometry and Linear Algebra), Moscow, 2015, 445 p. (in Russ.)
12. Rabysh A.Yu., Demin A.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2008, no. 58, pp. 31–36. (in Russ.)
13. Abramochkin E.G., Volostnikov V.G. *Sovremennaya optika gaussovykh puchkov* (Modern Gaussian Beam Optics), Moscow, 2010, pp. 180–184. (in Russ.)
14. Ivanova A.V. *Komp'yuternyye metody optimizatsii opticheskikh sistem* (Computer Methods for Optimizing Optical Systems), St. Petersburg, 2010, 114 p. (in Russ.)
15. Ivanova T.V., Voznesenskaya A.O. *Vvedeniye v prikladnuyu i komp'yuternuyu optiku* (Introduction to Applied and Computer Optics), St. Petersburg, 2013, 99 p. (in Russ.)

Data on authors

- Evgeny N. Sechak** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Engineering Research; E-mail: evgenysechak@gmail.com
- Nataliya F. Erkhova** — P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Astro Space Center, Laboratory of High-Resolution Astrophysics; Junior Researcher; E-mail: erhovanf@lebedev.ru
- Aleksey O. Kolesnikov** — P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Spectroscopy Department of Optics Division; Junior Researcher; E-mail: kolesnikovao@lebedev.ru

The article was submitted 24.09.2021; approved after reviewing 26.10.2021; accepted for publication 30.12.2021.

**ФАЗОВЫЕ МАСКИ ИЗ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ ПЛАСТИН
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННОГО ОЧЕРТАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ
С УЛЬТРАКОРОТКИМИ ИМПУЛЬСАМИ
ПРИ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ В ПЛОСКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ**

Г. К. Костюк, В. А. Шкуратова*, А. А. Петров, М. М. Сергеев

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия***shkuratova_va@mail.ru*

Аннотация. Представлены фазовые маски, выполненные из двулучепреломляющих кристаллических пластин CaCO_3 , для получения заданного очертания лазерных пучков в схеме построения изображения с распределением интенсивности по сечению пучка, близким к распределению с плоской вершиной. Принцип работы фазовых масок основан на создании фазового сдвига π или 2π (в зависимости от исходной толщины пластины) в линейно поляризованном излучении, проходящем через вытравленные области заданной формы. Фазовый сдвиг в областях заданной формы преобразуется в распределение интенсивности на выходе анализатора, которое с уменьшением проецируется объективом в плоскость изображения, совмещенную с плоскостью микрообработки или мишенью. Фазовые маски в форме квадрата и квадрата в квадрате изготовлены путем обработки оптически прозрачных материалов лазерно-индуцированной микроплазмой и успешно протестированы в экспериментальной установке в схеме построения изображения с лазером, излучающим на длине волны 1,06 мкм импульсы длительностью 120 нс. Также фазовые маски использованы в этой экспериментальной установке для лазерной абляции образцов полированной стали. Формы отпечатков на образцах хорошо соответствовали очертаниям формируемых пучков.

Ключевые слова: фазовая маска, геометрический фазовый элемент, лазерный пучок, поляризация, двулучепреломляющий кристалл

Благодарности: работа поддержана Российским научным фондом [проект № 20-71-10103].

Ссылка для цитирования: Костюк Г. К., Шкуратова В. А., Петров А. А., Сергеев М. М. Фазовые маски из двулучепреломляющих пластин для получения заданного очертания лазерных пучков с ультракороткими импульсами при обработке материалов в плоскости изображения // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 101—111. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-101-111.

**PHASE MASKS MADE OF BIREFRINGENT PLATES
FOR SHAPING LASER BEAMS WITH ULTRASHORT PULSES
FOR LASER MATERIAL PROCESSING IN THE IMAGE PLANE**

G. K. Kostyuk, V. A. Shkuratova*, A. A. Petrov, M. M. Sergeev

*ITMO University, St. Petersburg, Russia***shkuratova_va@mail.ru*

Abstract. Phase masks made of birefringent CaCO_3 crystal plates are developed to create laser beam with a given shape and intensity distribution close to flat-top in image construction scheme. The principle of phase masks operation is based on creating the phase shift of π or 2π (depending on the initial plate thickness) in linearly polarized radiation passing through etched areas with given shapes. The phase shift in these areas transforms into the intensity distribution at an analyzer output, which can be projected with a demagnification by a high-quality lens into its image plane aligned with the micro-processing plane (target). Phase masks in the form of a square and a square in a square are made by processing optically transparent materials with laser-induced microplasma and successfully tested in an experimental setup in an imaging scheme with a laser emitting pulses of 120 ns duration at the wavelength of 1.06 μm . Phase masks are also used in this experimental setup for laser ablation of polished steel samples. The shapes of footprints on samples well match the formed beams shapes.

Keywords: phase masks, geometric phase elements, laser beams, polarization, birefringent crystals

Acknowledgments: the work was supported by the Russian Science Foundation [project no. 20-71-10103].

For citation: Kostyuk G. K., Shkuratova V. A., Petrov A. A., Sergeev M. M. Phase masks made of birefringent plates for shaping laser beams with ultrashort pulses for laser material processing in the image plane. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 2. P. 101—111 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-101-111.

Введение. В последние годы созданию точного и четкого очертания лазерных пучков с ультракороткими импульсами требуемой формы и преимущественно плоской вершиной распределения интенсивности в заданных пределах уделяется значительное внимание. Подобные лазерные пучки широко применяются не только при микрообработке различных материалов, таких как металлы [1, 2], полупроводники [3, 4], диэлектрики [5, 6] и полимеры [7, 8], но также в оптическом манипулировании [9, 10] и траппировании охлажденных атомов [11, 12].

На сегодняшний день получение заданного очертания лазерных пучков в большинстве случаев основано на использовании пространственных световых модуляторов (ПСМ), сведения о применении которых впервые появились в 1989 г. [13]. Значительное усложнение и усовершенствование конструкции ПСМ за последние годы сделало их одним из самых востребованных (как в научном, так и в промышленном применении) оптических приборов. Например, ПСМ используются для создания спиральных лазерных пучков, несущих орбитальный угловой момент [14, 15], и для микрообработки материалов ультракороткими лазерными импульсами [1—8].

Методы получения заданного очертания лазерного пучка принято разделять на две основные группы. В первой очертание лазерного пучка создается с применением дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [16, 17], амплитудных [18, 19], бинарных [20] и градиентных [21] масок и в дальнейшем проецируется в плоскость изображения, совмещенную с плоскостью микрообработки или мишенью. За этой группой закрепилось название „методы реального пространственного очертания“. Во второй группе пространственно варьируемая фаза на маске или на ПСМ отображается в желаемое распределение интенсивности соответствующего очертания в фокальной плоскости объектива (в дальнем поле), совмещенной с плоскостью микрообработки или мишенью. Методы этой группы принято называть пространственными фурье-методами. В наиболее значимых работах, посвященных методам второй группы [22, 23], достигнуты распределения интенсивности с плоской вершиной, а также кольцевые, квадратные и треугольные очертания пучков в фокальной плоскости, программируемой модуляцией волнового фронта. Тем не менее, из этих и из других работ (например, [24, 25]) видно, что фазовая модуляция падающего пучка может быть усложнена при получении желаемой формы пучка в фокальной плоскости. Таким образом, точность очертания пучка методами этой группы в фокальной плоскости, обеспечиваемая алгоритмами трудоемкого итеративного расчета (например, Gerchberg и Saxton [26]), все еще не идеальна из-за сложной природы дифракции света. В частности, по этой причине в последние годы количество исследований по очертанию лазерных пучков заданной формы методами первой группы значительно возросло [20, 21]. Важно отметить, что все эти исследования выполнены с применением ПСМ.

В настоящей работе для преобразования распределения интенсивности по сечению лазерных пучков предлагается использовать фазовые маски (ФМ), выполненные на пластинах из двулучепреломляющего кристалла, кристаллическая ось которого ориентирована параллельно поверхности пластины (так называемый Y-срез), в схеме построения изображения. Такие ФМ применяются в методах первой группы. Предполагается, что двулучепреломляющие ФМ значительно более просты в реализации и в использовании, по сравнению с ПСМ, которые на сегодняшний день в основном применяются для методов этой группы.

Прежде чем перейти к изложению сути принципа работы ФМ, хотелось бы отметить, что настоящая работа является продолжением наших исследований по применению случайной фазовой пластины, выполненной из двулучепреломляющего кристалла CaCO_3 , для создания распределения интенсивности с плоской вершиной в дальнем поле [27] и спирального

фазового задерживающего элемента, выполненного из двулучепреломляющего кристалла CaCO_3 , для создания радиально и азимутально поляризованных пучков из линейно поляризованного гауссова пучка [28]. Упомянутые элементы были изготовлены с использованием технологии структурирования оптически прозрачных материалов лазерно-индуцированной микроплазмой (ЛИМП). Суть технологии ЛИМП подробно изложена в работах [29—31]. Было показано, что глубина травления двулучепреломляющей кристаллической пластины CaCO_3 технологией ЛИМП достигает 14 мкм за десять последовательных сканирований при шероховатости поверхности 50 ± 10 нм [29].

В рамках настоящего исследования на двулучепреломляющих кристаллических пластинах CaCO_3 технологией ЛИМП изготовлены ФМ в форме квадрата и квадрата в квадрате, обеспечивающие формирование распределения интенсивности, близкого к распределению с плоской вершиной, в схеме построения изображения. Для подтверждения работоспособности изготовленные ФМ были протестированы в лазерной установке с наносекундным Nd:YAG-лазером (длина волны 1,06 мкм). Формируемые с их применением распределения интенсивности были зарегистрированы с использованием ПЗС-камеры. Также методом лазерной абляции на листах полированной стали были получены отпечатки, соответствующие по форме распределениям интенсивности, реализуемым с применением изготовленных ФМ.

Теоретические основы и выбор оптических конфигураций ФМ. ФМ, предлагаемые в настоящей работе для получения требуемого очертания пучка с распределением интенсивности, близким к распределению с плоской вершиной в пределах очертания, могут быть выполнены травлением на заданную глубину, обеспечивающую фазовый сдвиг π или 2π — в зависимости от толщины исходной пластины. Травлению на заданную глубину может быть подвергнута область любой формы на исходной пластине, в дальнейшем задающая форму очертания пучка. При этом ФМ должны быть изготовлены на пластине из двулучепреломляющего кристалла, кристаллическая ось которого ориентирована параллельно поверхности пластины.

При установке ФМ с вытравленными областями между линейным поляризатором (П) с азимутом пропускания, направленным под углом 45° к главным осям кристаллической пластины, и анализатором (А), азимут пропускания которого может быть ориентирован как перпендикулярно, так и параллельно азимуту пропускания П, в зависимости от толщины исходной пластины, очертание вытравленной области преобразуется в распределение интенсивности на выходе А. Полученное подобным образом распределение интенсивности с четко очерченными краями в дальнейшем проецируется с уменьшением объективом в плоскость изображения, совмещенную с плоскостью микрообработки или мишенью.

При изготовлении ФМ на исходной пластине толщиной $h_0 \sim \lambda/2$, обеспечивающей поворот вектора линейной поляризации в падающем пучке на 90° на выходе из нее, глубина травления областей определяется из условия сохранения направления этого вектора на выходе из вытравленных областей по отношению к его направлению в падающем пучке, т.е. в соответствии с выражением [32]:

$$h_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{n_o - n_e}, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения, n_o и n_e — показатель преломления обыкновенной и необыкновенной волны.

При изготовлении ФМ на исходной пластине толщиной $h_0 \sim \lambda$, обеспечивающей сохранение направления вектора линейной поляризации в падающем пучке на выходе из нее, глубина травления областей определяется из условия поворота вектора на 90° на выходе из вытравленных областей по отношению к его направлению в падающем пучке [32]:

$$h_\lambda = \frac{\lambda}{2(n_o - n_e)}. \quad (2)$$

Для исследования были изготовлены две ФМ, рассчитанные на применение на длине волны 1,06 мкм. Первая ФМ с центральной областью в форме квадрата была изготовлена на исходной пластине толщиной $1,017 \pm 0,006$ мкм ($h_0 \sim \lambda$), обеспечивающей сохранение направления вектора линейной поляризации в падающем пучке. Вторая ФМ с центральной областью в форме квадрата в квадрате была изготовлена на исходной пластине толщиной $1,020 \pm 0,006$ мкм ($h_0 \sim \lambda/2$), обеспечивающей поворот вектора линейной поляризации в падающем пучке на 90° . Оптические конфигурации ФМ, изготовленных технологией ЛИМП на пластинах CaCO_3 размером 10×10 мм толщиной $1,017 \pm 0,006$ ($h_0 \sim \lambda$) для первой ФМ (а), а также толщиной $1,020 \pm 0,006$ ($h_0 \sim \lambda/2$) для второй ФМ (б) представлены на рис. 1 (1 — диаметр гауссова пучка в плоскости установки ФМ ($d \sim 7$ мм), 2 — вытравленные области). Также на рис. 1 приведены рассчитанные в соответствии с соотношениями (1) и (2) значения глубины травления для $\lambda = 1,06$ мкм.

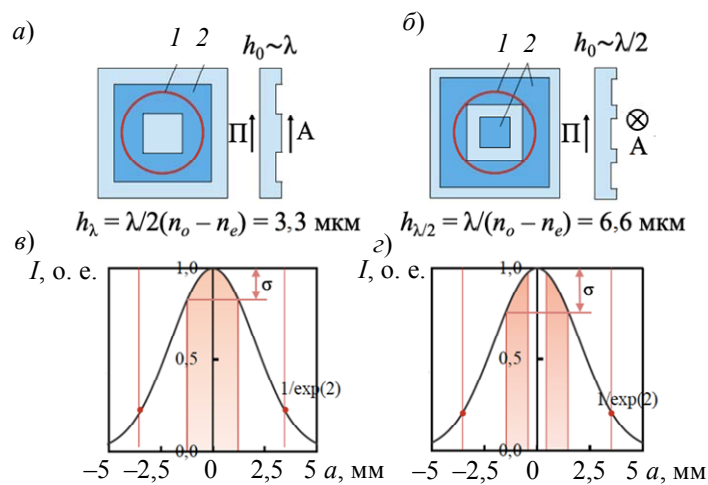


Рис. 1

Для оптических конфигураций ФМ, изготовленных с целью исследования заданного очертания пучка в плоскости изображения, а также другой ФМ, например, в форме круга, кольца или прямоугольника, стремящееся к нулю распределение интенсивности на выходе А будет возникать при любом значении амплитуды вектора линейной поляризации в исходном гауссовом пучке. В то же время распределение интенсивности на выходе А, стремящееся к максимуму, при различных значениях амплитуды вектора линейной поляризации в исходном гауссовом пучке будет отличаться от распределения с плоской вершиной. Это отклонение будет определяться участком гауссова профиля в исходном пучке, который приходится на соответствующие области ФМ, и зависеть от диаметра исходного пучка и размера области на ФМ, формирующей область с максимальной интенсивностью (рис. 1). Для оценки отклонения между распределением интенсивности в областях, значение интенсивности в которых стремится к максимуму, и распределением с плоской вершиной использовалось максимальное значение интенсивности гауссова пучка, приходящееся на соответствующую область (рис. 1). Максимальное значение отклонения σ от распределения с плоской вершиной выбрано в предположении, что при $\sigma \leq 0,3$ ФМ должна обеспечить приемлемое качество очертания пучка (согласно сообщениям о применении различного вида ФМ, проецируемых в плоскость изображения [33]).

Перед изготовлением обеих ФМ, выбранных нами для дальнейшего исследования, были рассчитаны зависимости максимального отклонения σ от плоской вершины в пределах очертания пучка, возникающего на выходе А, а также коэффициент эффективности преобразова-

ния пучка η [20] — от размера вытравленной области на ФМ при диаметре падающего на нее лазерного пучка $d \sim 7$ мм:

$$\eta = \frac{I_{\text{shaped}}}{I_0} \times 100 \%, \quad (3)$$

где I_{shaped} — интеграл профиля формируемого распределения интенсивности, I_0 — интеграл профиля исходного распределения интенсивности.

Результаты расчета зависимостей σ и η от размера a (длины и ширины) области травления для первой (а) и второй ФМ (б) представлены на рис. 2.

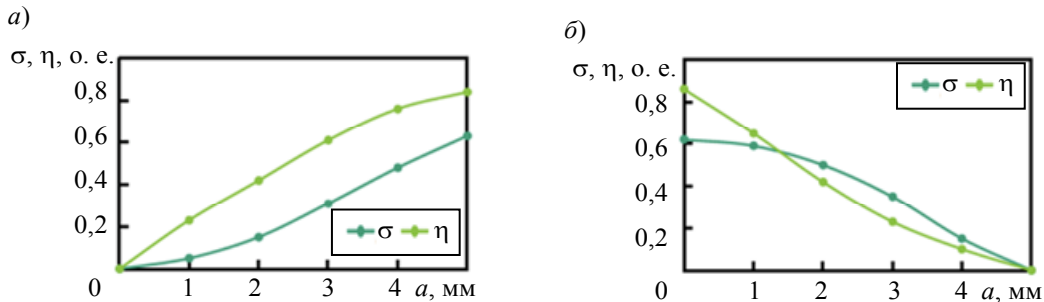


Рис. 2

Эффективность преобразования определялась с использованием модели гауссова распределения. При этом рассчитывалась площадь фигуры под графиком нормального распределения, ограниченного по уровню амплитуды $1/\exp(2)$ значениями $[-3,5; 3,5]$ по одной из координат. В зависимости от площади рассчитываемой ФМ те или иные области, интенсивность в которых стремилась к нулю, исключались из расчета. Размер области травления a для каждой ФМ выбирался согласно рассчитанным зависимостям $\sigma = f(a)$ и $\eta = f(a)$. При этом для каждой конфигурации находилось компромиссное значение a , обеспечивающее приемлемое качество очертания (отклонение $\sigma \leq 0,3$) и приемлемую эффективность преобразования ($\eta \geq 50 \%$).

Согласно зависимостям $\sigma = f(a)$ и $\eta = f(a)$ для изготовления первой ФМ (рис. 2, а) длина стороны квадрата a выбиралась из двух значений: 2,5 и 3,0 мм. Было выбрано первое значение, поскольку при $a = 2,5$ мм: $\sigma = 0,23$; $\eta = 0,535$; при $a = 3,0$ мм: $\sigma = 0,3$; $\eta = 0,62$.

Как видно из зависимостей $\sigma = f(a)$ и $\eta = f(a)$ (рис. 2, б), значение a (при заданной стороне внешнего квадрата 5 мм) не позволяет достичь $\sigma \leq 0,3$ и $\eta \geq 50 \%$. Однако представляется возможным достижение $\sigma \sim 0,46$ и $\eta \sim 0,42$ при $a = 2$ мм. Поскольку отклонение от плоской вершины σ в очертании пучка в большей мере определяет качество прецизионной лазерной обработки, анализировались зависимости $\sigma = f(a)$ и $\eta = f(a)$ для меньших размеров внешнего квадрата.

На рис. 3 представлены зависимости $\sigma = f(a)$ и $\eta = f(a)$, при которых стороны внешнего квадрата были равны 4 (рис. 3, а), 3 (б) и даже 2,5 мм (в). Видно, что при стороне 3 мм и $a = 1$ мм возможно достичь $\sigma \sim 0,27$ и $\eta \sim 0,36$. Именно конфигурация „квадрат в квадрате“ выбрана нами для изготовления ФМ, поскольку значение σ , полученное при $\eta \sim 0,36$, является вполне достаточным.

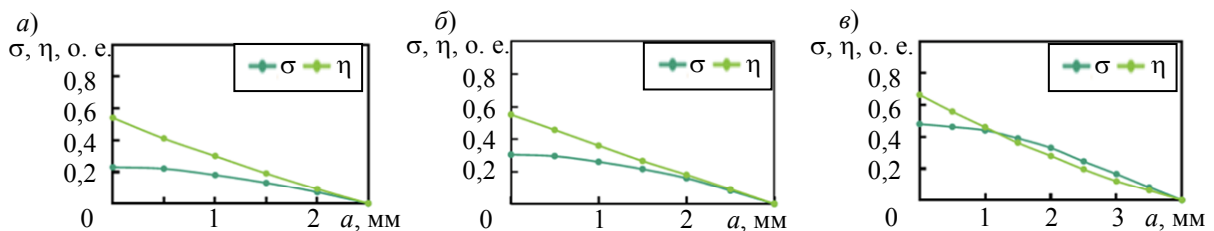


Рис. 3

Следует отметить, что предложенные конфигурации ФМ перспективны для ряда задач лазерной микрообработки, в которых присутствие даже минимальных значений интенсивности в крыльях распределения за пределами конфигурации ФМ недопустимо. Для обеих ФМ

распределение интенсивности на выходе А за пределами внешних границ конфигураций стремится к нулю, вследствие чего исключается даже минимальная интенсивность, которая присутствует в гауссовом пучке за пределами очертания ФМ.

Описание экспериментальной установки. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4. Лазерное излучение (диаметр пучка ~ 7 мм, длина волны 1,06 мкм, длительность импульса 120 нс, максимальная частота следования импульсов 100 кГц, качество пучка $M^2 \sim 2$, энергия в импульсе до 1 мДж, средняя мощность до 50 Вт) от лазерного источника IPG YLPN 1-50 (1) проходило через нейтральный фильтр (2), линейный П (призму Глана) (3), ФМ (4) и линейный А (призму Глана) (5). Светоделительная пластина (6), установленная после второй призмы Глана, отражала часть лазерного пучка на объектив (7) с фокусным расстоянием $f = 50$ мм и числовой апертурой $NA = 0,25$. Сфокусированный пучок регистрировался ПЗС-камерой Gentec Beamage 3.0 (8) для наблюдения очертания пучка, формируемого на выходе А, с увеличением 1,0. Расстояние u от выхода А (второй призмы Глана) до объектива и расстояние v от объектива до плоскости установки ПЗС-камеры выбиралось ($u=v=2f$) в соответствии с уравнением тонкой линзы:

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}. \quad (4)$$

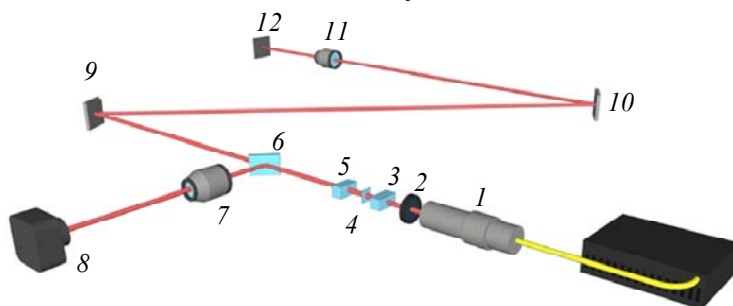


Рис. 4

Вторая часть пучка, прошедшая через светоделительную пластину (6), отражалась от зеркал (9, 10), обеспечивающих удлинение оптического пути пучка, и проецировалась объективом (11) с $f=50$ мм и $NA=0,25$ на образцы полированной стали (12), зафиксированные на трехкоординатном столике.

Регистрация очертаний пучков ПЗС-камерой. Главные направления осей кристаллической пластины, на которой изготовлены ФМ, были направлены под углом 45° по отношению к азимуту пропускания П. Азимут пропускания А в зависимости от толщины исходной кристаллической пластины мог быть ориентирован как параллельно, так и перпендикулярно азимуту пропускания П. Распределение интенсивности на выходе А строилось в плоскости размещения ПЗС-камеры объективом с $f=50$ мм при $u=v=2f$.

На рис. 5 представлены оптические конфигурации изготовленных ФМ, а также профили пучков, зарегистрированные ПЗС-камерой (a — исходный пучок; b — пучок, полученный с применением первой ФМ; c — пучок, полученный с применением второй ФМ), и соответствующие распределения интенсивности по сечению пучков. Кроме того, на рис. 5 показаны профиль и распределение интенсивности исходного лазерного пучка. Видно, что распределения исходного пучка успешно преобразованы в требуемые распределения с применением изготовленных ФМ. Из рис. 5 также видно, что зарегистрированные профили распределения интенсивности в пределах очерченных областей, как и ожидалось, близки к распределению интенсивности с плоской вершиной. Поэтому для оценки качества пучка в пределах этих областей было решено воспользоваться международным стандартом ISO 13694:2000 [34]. В соответствии с ним нормированное максимальное отклонение от плоской вершины в распределении интенсивности в пределах очертания лазерного пучка по экспериментальным данным принято оценивать в соответствии с уравнением:

$$R = \frac{|I_i - I_i^f|_{\max}}{I_{\max}}, \quad 0 \leq R \leq 1, \quad (5)$$

где I_i — измеренное распределение интенсивности, I_i^f — аппроксимированное теоретическое распределение интенсивности, $I_{\max}$ — максимальное значение интенсивности.

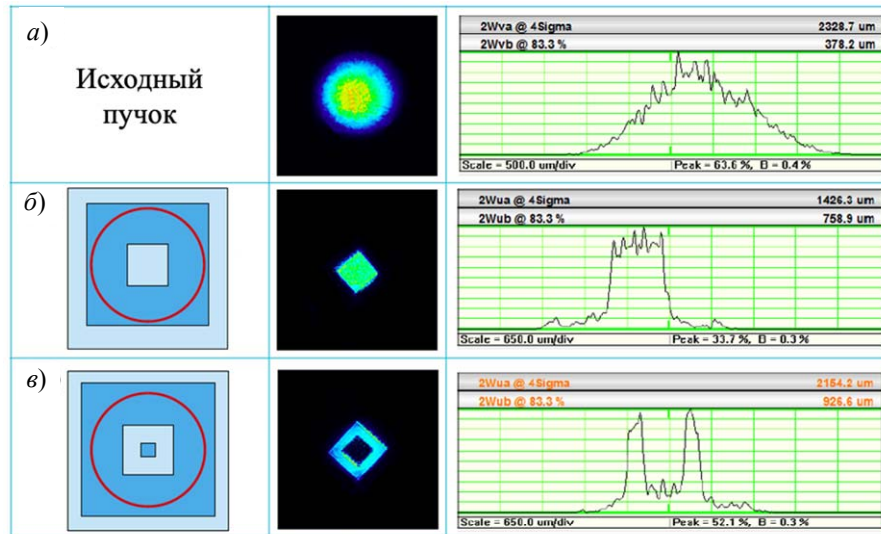


Рис. 5

Для ФМ с центральной областью в форме квадрата (рис. 5, б) R , рассчитанное по экспериментальным результатам, составило 0,17, для ФМ с центральной областью в форме квадрата в квадрате (рис. 5, в) — 0,15.

Формирование отпечатков в плоскости изображения проекционного объектива. Очертание пучков на выходе А реконструировалось в плоскости изображения проекционного объектива. Положение плоскости изображения было рассчитано в соответствии с уравнением тонкой линзы (4).

Из уравнения (4) следует, что расстояние от проекционного объектива до плоскости построения изображения:

$$v = \frac{fu}{u - f}, \quad (6)$$

отсюда при $f=50$ и $u=1950$ мм следует $v=51,32$ мм.

Увеличение изображающей системы:

$$\beta = \frac{v}{u}. \quad (7)$$

При увеличении изображающей системы 0,026 и максимальном размере вытравленной области 5 мм размер (длина стороны) реконструируемого пучка в плоскости изображения должен быть ~130 мкм. Размеры реконструируемых пучков в плоскости изображения при $a=2,5$ мм для первой ФМ и при выбранном размере внешнего квадрата 3 мм для второй ФМ были соответственно равны 65 и 78 мкм.

Размер реконструируемого пучка в плоскости изображения может быть уменьшен при увеличении расстояния u , например, при использовании одного или двух дополнительных зеркал с высокой степенью отражения.

Микрофотографии отпечатков на образцах полированной нержавеющей стали, полученных при абляции под воздействием лазерных пучков, сформированных с применением ФМ, показаны на рис. 6. Энергия в импульсе, измеренная перед проекционным объективом, равна 1 мДж. Так как частота следования импульсов составляла 50 кГц и число импульсов, использованных для формирования отпечатков, достигало $5 \cdot (10^3 - 10^4)$, время формирования

каждого отпечатка составляло $\sim 0,1$ — $1,0$ с. Все отпечатки были исследованы на оптическом микроскопе Axio Carl Zeiss.

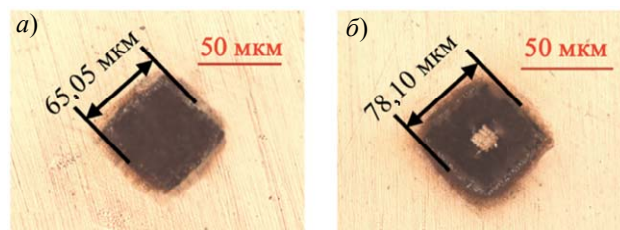


Рис. 6

Из рис. 6 видно, что пучки, полученные с применением первой и второй ФМ, имели форму квадрата (а) и квадрата в квадрате (б). Очертания пучков, наблюдаемые на ПЗС-камере, соответствуют контурам отпечатков, полученных абляцией на образцах полированной нержавеющей стали в плоскости изображения.

Результаты микрообработки образцов полированной нержавеющей стали с использованием второй ФМ, обладающей сложной конфигурацией, показали, что с применением предложенных ФМ возможно получить произвольные формы распределения интенсивности в плоскости изображения при лазерной микрообработке с достаточной плотностью энергии. Очевидно, что ФМ также могут быть использованы для микрообработки других материалов.

Закключение. В настоящей работе предложены ФМ, выполненные на пластинах из двулучепреломляющего кристалла, для получения в схеме построения изображения заданных очертаний лазерных пучков с малой длительностью импульса и с распределением интенсивности в пределах очертания, близким к распределению с плоской вершиной. Максимальное отклонение от плоской вершины σ в полученных пучках в пределах очертания не превышало 0,23 при эффективности преобразования пучка $\eta \sim 53,5$ % для ФМ в форме квадрата и 0,27 при $\eta \sim 36$ % для ФМ в форме квадрата в квадрате. У обеих ФМ распределение интенсивности на выходе А за пределами внешних границ конфигураций стремилось к нулю, что свидетельствует о реальных перспективах их применения в лазерной микрообработке.

При изготовлении ФМ на исходной пластине толщиной, обеспечивающей поворот направления вектора линейной поляризации на 90° на выходе из нее, глубина травления находилась из условия сохранения направления вектора линейной поляризации. При изготовлении ФМ на исходной пластине толщиной, обеспечивающей сохранение направления вектора линейной поляризации в падающем пучке на входе из нее, глубина травления находилась из условия поворота направления вектора линейной поляризации на 90° .

Для изготовления ФМ была применена технология ЛИМП. ФМ были изготовлены на пластинах из двулучепреломляющего кристалла CaCO_3 , кристаллическая ось которого ориентирована параллельно поверхности пластин. Глубина травления областей ФМ, задающих их конфигурацию, в зависимости от толщины исходной пластины обеспечивала сдвиг фазы π или 2π . При установке изготовленных ФМ между линейным П, азимут пропускания которого ориентирован под углом 45° к направлению главных осей кристаллической пластины, и линейным анализатором А, азимут пропускания которого ориентирован параллельно либо перпендикулярно азимуту пропускания П (в зависимости от толщины исходной кристаллической пластины), очертание вытравленной области ФМ было преобразовано в распределение интенсивности на выходе А с четко очерченными границами, которое в дальнейшем проецировалось объективом в плоскость изображения, совмещенную с плоскостью микрообработки.

Очертания отпечатков, полученных лазерной абляцией на пластинах полированной стали, соответствуют конфигурациям ФМ. Качество обработки пластин позволяет предположить, что предложенные в рамках исследования ФМ перспективны как при обработке тонких металлических пленок, так и при создании поверхностных структур на других материалах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu Z., Yao X., Cheng X., Wu H., Wang H., Shen H. Experimental study on two-phase boiling in wavy copper microchannels fabricated with ultrafast laser micromachining // *J. Micromech. Microeng.* 2020. Vol. 30, N 065011.
2. Worts N., Jones J., Squier J. Surface structure modification of additively manufactured titanium components via femtosecond laser micromachining // *Opt. Commun.* 2019. Vol. 430. P. 352—357.
3. Gao B., Chen T., Cui W., Li C., Si J., Hou X. Processing grating structures on surfaces of wide-bandgap semiconductors using femtosecond laser and phase mask // *Opt. Eng.* 2015. Vol. 54, N 126106.
4. Roth G. L., Adelman B., Hellmann R. Cutting and drilling of SiC semiconductor by fiber laser // *J. Laser Micro Nanoeng.* 2015. Vol. 10. P. 279—283.
5. Wang M., Lin J. T., Xu Y. X., Fang Z. W., Qiao L. L., Liu Z. M., Fang W., Cheng Y. Fabrication of high-Q microresonators in dielectric materials using a femtosecond laser: Principle and applications // *Opt. Commun.* 2017. Vol. 395. P. 249—260.
6. Ali J. M. Y., Shanmugam V., Lim B., Aberle A. G., Mueller T. Femtosecond laser ablation of dielectric layers for high-efficiency silicon wafer solar cells // *Sol. Energy.* 2018. Vol. 164. P. 287—291.
7. Paun I. A., Zamfirescu M., Mihailescu M., Luculescu C. R., Mustaciosu C. C., Dorobantu I., Calenc B., Dinescu M. Laser micro-patterning of biodegradable polymer blends for tissue engineering // *J. Mater. Sci.* 2015. Vol. 50. P. 923—936.
8. Li Q., Perrie W., Potter R., Allegre O., Li Z., Tang Y., Zhu G., Liu D., Chalker P., Ho J. Femtosecond laser micro-structuring of amorphous Polyether (ether) ketone (PEEK) at 775 nm and 387 nm // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2020. Vol. 53, N 365301.
9. Polimeno P., Magazzu A., Iati M. A., Patti F., Saija R., Boschi C. D. E., Donato M. G., Gucciardi P. G., Jones P. H., Volpe G., Marago O. M. Optical tweezers and their applications // *J. Quant Spectrosc. Radiat. Transf.* 2018. Vol. 218. P. 131—150.
10. Gordon R. Biosensing with nanoaperture optical tweezers // *Opt. Laser Technol.* 2019. Vol. 109. P. 328—335.
11. Ji X., Mu R., Fang J., Xu S., Han L. Generation of a dark hollow beam by a four-step phase plate and its application for manipulating cold atoms // *Proc. of SPEE — Quantum Optics and Applications in Computing and Communications II.* 2005. Vol. 5631. P. 237—243.
12. Xia Y., Yin J. Generation of a focused hollow beam by an 2pi-phase plate and its application in atom or molecule optics // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2005. Vol. 22. P. 529—536.
13. McKnight D. J., Vass D. G., Sillitto R. M. Development of a spatial light modulator: a randomly addressed liquid-crystal-over-nMOS array // *Appl. Opt.* 1989. Vol. 28. P. 4757—4762.
14. Courtial J., Dholakia K., Allen L., Padgett M. J. Gaussian beams with very high orbital angular momentum // *Opt. Commun.* 1997. Vol. 144. P. 210—213.
15. Zhou N., Liu J., Wang J. Reconfigurable and tunable twisted light laser // *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8. P. 1—10.
16. Qu W., Gu H., Tan Q., Jin G. Precise design of two-dimensional diffractive optical elements for beam shaping // *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54. P. 6521—6525.
17. Katz S., Kaplan N., Grossinger I. Using Diffractive Optical Elements: DOEs for beam shaping—fundamentals and applications // *Optik & Photonik.* 2018. Vol. 13. P. 83—86.
18. Mizunami T., Kawashima H., Hayashi A. A flexible fabrication technique of long-period fiber gratings using a tilted amplitude mask // *Proc. of 2002 IEEE/LEOS Workshop on Fibre and Optical Passive Components (Cat. No. 02EX595).* 2002. P. 92—97.
19. Zhao Q., Gong L., Li Y. M. Shaping diffraction-free Lommel beams with digital binary amplitude masks // *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54. P. 7553—7558.
20. Kuang Z., Li J., Edwardson S., Perrie W., Liu D., Dearden G. Ultrafast laser beam shaping for material processing at imaging plane by geometric masks using a spatial light modulator // *Opt. Lasers Eng.* 2015. Vol. 70. P. 1—5.
21. Li J., Kuang Z., Edwardson S., Perrie W., Liu D., Dearden G. Imaging-based amplitude laser beam shaping for material processing by 2D reflectivity tuning of a spatial light modulator // *Appl. Opt.* 2016. P. 1095—1100.

22. Sanner N., Huot N., Audouard E., Larat C., Huignard J., Loiseaux B. Programmable focal spot shaping of amplified femtosecond laser pulses // *Opt. Lett.* 2005. Vol. 30. P. 1479—1481.
23. Sanner N., Huot N., Audouard E., Larat C., Huignard J. Direct ultrafast laser microstructuring of materials using programmable beam shaping // *Opt. Lasers Eng.* 2007. Vol. 45. P. 737—741.
24. Liu D., Kuang Z., Shang S., Perrie W., Karnakis D., Kearsley A., Knowles M., Edwardson S., Dearden G., Watkins K. Ultrafast parallel laser processing of materials for high throughput manufacturing // *Proc. of LAMP2009 — the 5th Intern. Congress on Laser Advanced Materials Processing.* 2009. P. 1—5.
25. Allegre O. J., Jin Y., Perrie W., Ouyang J., Fearson E., Edwardson S., Dearden J. Complete wavefront and polarization control for ultrashort-pulse laser microprocessing // *Opt. Express.* 2013. Vol. 21. P. 21198—21207.
26. Gerchberg R. W., Saxton W. O. A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures // *Optik.* 1972. Vol. 35. P. 237—246.
27. Shkuratova V. A., Kostyuk G. K., Sergeev M. M., Zakoldaev R. A., Yakovlev E. B. Speckle-free smoothing of coherence laser beams by a homogenizer on uniaxial high birefringent crystal // *Opt. Mat. Express.* 2019. Vol. 9. P. 2392—2399.
28. Shkuratova V., Kostyuk G., Sergeev M., Vikhrova E. Rapid fabrication of spiral varying retarder for using in simple schemes of generating radial and azimuthal vector optical fields // *IEEE Photonics J.* 2019. Vol. 11, N 2201112.
29. Shkuratova V., Rymkevich V., Kostyuk G., Sergeev M. Laser-induced microplasma as effective tool for phase Elements fabrication on amorphous and crystalline materials // *J. Laser Micro Nanoeng.* 2018. Vol. 13. P. 211—215.
30. Kostyuk G. K., Zakoldaev R. A., Sergeev M. M., Veiko V. P. Laser-induced glass surface structuring by LIBBH technology // *Opt. Quantum Electron.* 2016. Vol. 48, N 249.
31. Kostyuk G. K., Zakoldaev R. A., Koval V. V., Sergeev M. M., Rymkevich V. S. Laser microplasma as a tool to fabricate phase grating applied for laser beam splitting // *Opt. Lasers Eng.* 2017. Vol. 92. P. 63—69.
32. Born M., Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Elsevier, 2013.
33. Dickey F. M. Laser Beam Shaping: Theory and Techniques. CRC Press, 2000.
34. ISO 13694:2000 "Optics and optical instruments — Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam power (energy) density distribution" [Электронный ресурс]: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13694:ed-1:v1:en>> (дата обращения 01.10.2021).

Сведения об авторах

Галина Кирилловна Костюк

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; научный сотрудник; E-mail: gkkostiuk@itmo.ru

Виктория Александровна Шкуратова

— магистр; Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; инженер-исследователь; E-mail: shkuratova_va@mail.ru

Андрей Анатольевич Петров

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; старший преподаватель; E-mail: aapetrov@itmo.ru

Максим Михайлович Сергеев

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; старший научный сотрудник; E-mail: maxim.m.sergeev@gmail.com

Поступила в редакцию 10.11.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021; принята к публикации 30.11.2021.

REFERENCES

1. Liu Z., Yao X., Cheng X., Wu H., Wang H., Shen H. *J. Micromech. Microeng.*, 2020, no. 065011(30).
2. Worts N., Jones J., Squier J. *Opt. Commun.*, 2019, vol. 430, pp. 352—357.
3. Gao B., Chen T., Cui W., Li C., Si J., Hou X. *Opt. Eng.*, 2015, no. 126106(54).
4. Roth G.L., Adelmann B., Hellmann R. *J. Laser Micro Nanoeng.*, 2015, vol. 10, pp. 279—283.
5. Wang M., Lin J.T., Xu Y.X., Fang Z.W., Qiao L.L., Liu Z.M., Fang W., Cheng Y. *Opt. Commun.*, 2017, vol. 395, pp. 249—260.
6. Ali J.M.Y., Shanmugam V., Lim B., Aberle A.G., Mueller T. *Sol. Energy*, 2018, vol. 164, pp. 287—291.
7. Paun I.A., Zamfirescu M., Mihailescu M., Luculescu C.R., Mustaciosu C.C., Dorobantu I., Calenc B., Dinescu M. *J. Mater. Sci.*, 2015, vol. 50, pp. 923—936.
8. Li Q., Perrie W., Potter R., Allegre O., Li Z., Tang Y., Zhu G., Liu D., Chalker P., Ho J. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2020, no. 365301(53).

9. Polimeno P., Magazzu A., Iati M.A., Patti F., Saija R., Boschi C.D.E., Donato M.G., Gucciardi P.G., Jones P.H., Volpe G., Marago O.M. *J. Quant Spectrosc. Radiat. Transf.*, 2018, vol. 218, pp. 131–150.
10. Gordon R. *Opt. Laser Technol.*, 2019, vol. 109, pp. 328–335.
11. Ji X., Mu R., Fang J., Xu S., Han L. *Proceedings of SPEE - Quantum Optics and Applications in Computing and Communications II*, 2005, vol. 5631, pp. 237–243.
12. Xia Y., Yin J. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2005, vol. 22, pp. 529–536.
13. McKnight D.J., Vass D.G., Sillitto R.M. *Appl. Opt.*, 1989, vol. 28, pp. 4757–4762.
14. Courtial J., Dholakia K., Allen L., Padgett M.J. *Opt. Commun.*, 1997, vol. 144, pp. 210–213.
15. Zhou N., Liu J., Wang J. *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8, pp. 1–10.
16. Qu W., Gu H., Tan Q., Jin G. *Appl. Opt.*, 2015, vol. 54, pp. 6521–6525.
17. Katz S., Kaplan N., Grossinger I. *Optik & Photonik*, 2018, vol. 13, pp. 83–86.
18. Mizunami T., Kawashima H., Hayashi A. *Proceedings of 2002 IEEE/LEOS Workshop on Fibre and Optical Passive Components (Cat. No. 02EX595)*, 2002, pp. 92–97.
19. Zhao Q., Gong L., Li Y.M. *Appl. Opt.*, 2015, vol. 54, pp. 7553–7558.
20. Kuang Z., Li J., Edwardson S., Perrie W., Liu D., Dearden G. *Opt. Lasers Eng.*, 2015, vol. 70, pp. 1–5.
21. Li J., Kuang Z., Edwardson S., Perrie W., Liu D., Dearden G. *Appl. Opt.*, 2016, pp. 1095–1100.
22. Sanner N., Huot N., Audouard E., Larat C., Huignard J., Loiseaux B. *Opt. Lett.*, 2005, vol. 30, pp. 1479–1481.
23. Sanner N., Huot N., Audouard E., Larat C., Huignard J. *Opt. Lasers Eng.*, 2007, vol. 45, pp. 737–741.
24. Liu D., Kuang Z., Shang S., Perrie W., Karnakis D., Kearsley A., Knowles M., Edwardson S., Dearden G., Watkins K. *Proceedings of LAMP2009 – the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing*, 2009, pp. 1–5.
25. Allegre O.J., Jin Y., Perrie W., Ouyang J., Fearson E., Edwardson S., Dearden J. *Opt. Express*, 2013, vol. 21, pp. 21198–21207.
26. Gerchberg R.W., Saxton W.O. *Optik*, 1972, vol. 35, pp. 237–246.
27. Shkuratova V.A., Kostyuk G.K., Sergeev M.M., Zakoldaev R.A., Yakovlev E.B. *Opt. Mat. Express*, 2019, vol. 9, pp. 2392–2399.
28. Shkuratova V., Kostyuk G., Sergeev M., Vikhrova E. *IEEE Photonics J.*, 2019, no. 2201112(11).
29. Shkuratova V., Rymkevich V., Kostyuk G., Sergeev M. *J. Laser Micro Nanoeng.*, 2018, vol. 13, pp. 211–215.
30. Kostyuk G.K., Zakoldaev R.A., Sergeev M.M., Veiko V.P. *Opt. Quantum Electron.*, 2016, no. 249(48).
31. Kostyuk G.K., Zakoldaev R.A., Koval V.V., Sergeev M.M., Rymkevich V.S. *Opt. Lasers Eng.*, 2017, vol. 92, pp. 63–69.
32. Born M., Wolf E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, Elsevier, 2013.
33. Dickey F.M. *Laser Beam Shaping: Theory and Techniques*, CRC Press, 2000.
34. ISO 13694:2000 "Optics and optical instruments — Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam power (energy) density distribution", <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13694:ed-1:v1:en>.

Data on authors

Galina K. Kostyuk	—	PhD; ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; Research Fellow; E-mail: gkkostiuk@itmo.ru
Victoria A. Shkuratova	—	MSc; ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; Engineer-Researcher; E-mail: shkuratova_va@mail.ru
Andrey A. Petrov	—	PhD; ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; Senior Lecturer; E-mail: aapetrov@itmo.ru
Maksim M. Sergeev	—	PhD; ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; Senior Researcher; E-mail: maxim.m.sergeev@gmail.com

The article was submitted 10.11.2021; approved after reviewing 30.11.2021; accepted for publication 30.11.2021.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ СОВРЕМЕННОГО СТОМАТОЛОГИЧЕСКОГО БЛОКЕРА МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ

Л. И. ШАЛАМАЙ^{1*}, Е. Е. МАЙОРОВ², Е. Ю. МЕНДОСА³, В. Б. ЛАМПУСОВА¹, Н. С. ОКСАС¹

¹ Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И. П. Павлова
Санкт-Петербург, Россия

* l.shalamay@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Санкт-Петербург, Россия

³ Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова
Москва, Россия

Аннотация. Показана перспективность и актуальность метода оптической спектроскопии для исследования стоматологического композитного реставрационного материала. Дана краткая характеристика исследуемого образца. Приведены технические характеристики автоматизированного спектрального прибора UV-1280. Получены спектральные зависимости коэффициента пропускания композитного материала Omnichroma Blocker. Измерены спектры пропускания для десяти образцов толщиной 0,3; 0,5; 0,9 и более 1 мм. Определено, что толщины слоя 0,3—0,5 мм этого композита достаточно для маскировки дисколоритов и придания реставрациям опакости при восстановлении сквозных полостей передних зубов. Показано, что при толщине слоя образца 0,3 мм в видимом диапазоне длин волн коэффициент пропускания не превышает 10 %.

Ключевые слова: спектроскопия, коэффициент пропускания, терапевтическая стоматология, реставрация, композитный материал, блокер, неорганический наполнитель

Ссылка для цитирования: Шаламай Л. И., Майоров Е. Е., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Определение рабочей толщины слоя современного стоматологического блокера методом спектроскопии // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 112—117. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-112-117.

DETERMINATION OF THE WORKING LAYER THICKNESS OF A MODERN DENTAL BLOCKER BY SPECTROSCOPY

¹ Pavlov University, St. Petersburg, Russia

* l.shalamay@mail.ru

² St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
St. Petersburg, Russia

³ A. I. Evdokimov State University of Medical and Dentistry
Moscow, Russia

Abstract. The prospects and relevance of the optical spectroscopy method for study of modern stomatological restoration material are shown. A brief description of test sample is given. Technical characteristics of the automated spectral device UV-1280 are listed. Spectral dependences of optical transmittance of Omnichroma Blocker composite material are obtained. Transmission spectra are measured for ten samples with a thickness of 0.3; 0.5; 0.9 and more than 1 mm. It was determined that a layer thickness of 0.3–0.5 mm of this composite is sufficient to mask discolorations and make restorations opaque when restoring through cavities in the anterior teeth. It is shown that for a sample layer thickness of 0.3 mm, the transmission coefficient in the visible wavelength range does not exceed 10 %.

Keywords: spectroscopy, transmittance, therapeutic dentistry, restoration, composite material, blocker, inorganic filler

For citation: Shalamay L. I., Maierov E. E., Mendosa E. Yu., Lampusova V. B., Oksas N. S. Determination of the working layer thickness of a modern dental blocker by spectroscopy. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 2. P. 112—117 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-112-117.

Введение. На рынке медицинских стоматологических композитов представлен широкий выбор восстановительных материалов разных производителей [1, 2]. Лидирующее место среди них занимают японские композиты, в частности, Омнихрома Блокер (Omnichroma

Blocker). Как правило, производители композитов уделяют огромное внимание химическому составу вещества и его биомеханическим свойствам. Важной задачей исследования является получение данных по оптическим свойствам таких материалов.

Omnichroma Blocker — не только качественный, но и дорогостоящий материал, применяемый при выполнении эстетических реставраций полостей коронковой части зубов. Государственные стоматологические клиники не всегда в состоянии приобрести Omnichroma Blocker, а частные медицинские стоматологические центры, имея этот композит, порой используют его нерационально. На основании опроса врачей выявлено, что при восстановлении сквозного дефекта переднего зуба стоматолог использует от 1 до 5 мм опакowego композита, в зависимости от размеров кариозной полости. Цель настоящей работы — исследование оптических свойств Omnichroma Blocker методом спектроскопии и определение оптимальной рабочей толщины этого композита при выполнении реставрации.

Для измерения оптических свойств Omnichroma Blocker перспективно использовать методы оптической спектроскопии, основанные на качественном и количественном анализе элементного состава вещества, а также извлечении данных об электронной структуре молекул и твердых тел. Спектральные методы анализа в медицине используются далеко не в полной мере, что объясняется постоянным развитием аппаратной базы методов, с одной стороны, и сложностью состава и свойств биологических жидкостей и тканей — с другой [3, 4]. В основе методов лежат процессы, протекающие при взаимодействии двух форм материи — вещества и поля, излучения видимой, УФ- и ИК-областей спектра [5, 6]. Это взаимодействие приводит к различным энергетическим переходам, которые регистрируются экспериментально в виде поглощенного, отраженного, рассеянного и люминесцентного электромагнитных излучений. В настоящей работе измерялась интенсивность света, прошедшего сквозь образец в соответствующем диапазоне длин волн [7—11].

Объект и метод исследования. Omnichroma Blocker — светоотверждаемый, рентгеноконтрастный композитный материал. Omnichroma Blocker содержит 82 % по массе (71 % — по объему) кремний-циркониевого наполнителя и композитного наполнителя. Высокая степень наполненности композита обеспечивает низкую полимеризационную усадку. Весь неорганический наполнитель, содержащийся в Omnichroma Blocker, — сферический (средний размер частиц: 0,2 мкм, фракционный состав частиц: от 0,1 до 0,3 мкм). Мономерная основа содержит бис-глицедиметилметакрилат (Bis-GMA) и триэтиленгликоль диметакрилат.

Этот материал по биомеханическим свойствам перспективен для выполнения нагруженных реставраций твердых тканей передних и задних зубов. Неорганические наполнители на основе кремний-циркониевых соединений, входящие в состав Omnichroma Blocker, обеспечивают превосходную стойкость и надежность. Применяется Omnichroma Blocker для восстановления полостей всех классов Блека в случае необходимости устранить дисколорит или придать опакость реставрации.

Образцы материала разной толщины (0,3; 0,5; 0,9 и более 1 мм) в количестве 20 штук были предоставлены компанией ООО „Центр имплантации и комплексного лечения“ (Санкт-Петербург).

Измерения спектров пропускания проводились на автоматизированном спектрометре UV-1280 компании Shimadzu (рис. 1).



Рис. 1

Технические характеристики прибора приведены ниже.

Модель.....	UV-1280
Спектральный диапазон, нм.....	190—1100
Ширина щели, нм.....	5
Скорость сканирования, нм/мин.....	9—1600
Точность установки длины волны, нм.....	± 1
Воспроизводимость по шкале длин волн, нм.....	$\pm 0,3$
Уровень рассеянного излучения.....	$< 0,02 \%$
NaI, нм.....	220
NaNO ₂ , нм.....	340
Фотометрический диапазон.....	от $-3,0$ до $+3,0$ Abs (от 0 до 200 %)
Фотометрическая точность	
при 0,5 Abs.....	$\pm 0,002$
при 1,0 Abs.....	$\pm 0,004$
при 2,0 Abs.....	$\pm 0,006$
Фотометрическая воспроизводимость	
при 0,5 Abs.....	$\pm 0,002$
при 1,0 Abs.....	$\pm 0,002$
при 2,0 Abs.....	$\pm 0,002$
Дрейф нулевой линии, Abs/ч.....	0,001
Размеры прибора, мм.....	416×379×274
Масса, кг.....	10

UV-1280 предназначен для решения различных задач в научно-исследовательских лабораториях, лабораториях пищевой промышленности и экологического мониторинга, а также центров биологического и биотехнологического профиля. Последовательный интерфейс для подключения периферийных устройств (USB) и его функция контроля позволяют легко подключать принтер или персональный компьютер (ПК) с принтером. UV-1280 управляется с помощью встроенного русифицированного программного обеспечения (входит в стандартную комплектацию) и процессора, или с помощью ПК. Прибор поддерживает возможность подключения сканера штрих-кода, USB-клавиатуры и печать с помощью сетевого принтера. Кюветное отделение позволяет легко заменять стандартный держатель 10 мм кюветы на дополнительные приставки.

Спектрометр совместим с автосамплерами ASX-280 и ASX-560 (Teledyne CETAC). Элементы управления автосамплерами полностью интегрированы в программное обеспечение LabSolutions UV-Vis. Для каждого образца можно задать индивидуальные параметры проведения анализа. ASX-280: 120 виал (объем виал 15 мл), 2 стандартных планшета по 60 позиций в каждом. ASX-560: 240 виал (объем виал 15 мл), 4 стандартных планшета по 60 позиций в каждом [12—19].

Экспериментальные результаты. Для проведения измерений образец крепился специальным образом в канале измерений. На рис. 2 приведены образец и каналы измерения.

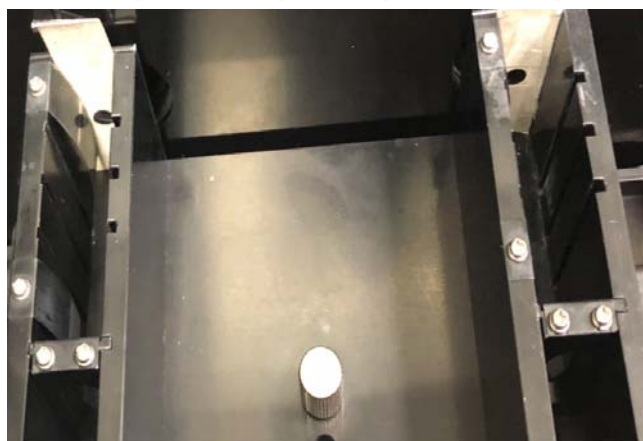


Рис. 2

Спектры пропускания измерены на двадцати образцах Omnichroma Blocker (рис. 3, 1 — 0,3; 2 — 0,5; 3 — 0,9; 4 — более 1 мм).

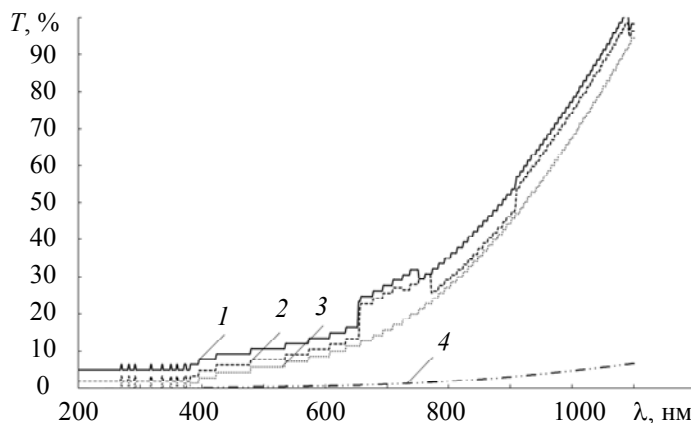


Рис. 3

Полученная информация о спектрах пропускания этих образцов подтверждает сильную зависимость от длин волн в диапазоне 250—400 нм. По форме спектральные кривые пропускания практически соответствуют, характерных сдвигов спектральных кривых не наблюдалось.

Таким образом, анализ показал, что при толщине 0,3 мм образец пропускает лишь 10 % светового излучения. А это означает, что данной толщины слоя композита Omnichroma Blocker достаточно для устранения излишней прозрачности и придания оптимальной opakовости реставрациям даже при восстановлении обширных сквозных дефектов твердых тканей зубов.

Заключение. Проведенное экспериментальное исследование Omnichroma Blocker спектральным методом имеет важное практическое значение как для терапевтической стоматологии, так и для оптического приборостроения. Эта методика показывает необходимую толщину слоя композита для точного воспроизведения эстетических параметров при восстановлении сквозных дефектов твердых тканей передних зубов. Полученные результаты дополняют информационную базу по исследуемому материалу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луцкая И. К. Практическая стоматология. Минск: Бел. наука, 1999. 360 с.
2. Виноградова Т. В., Уголева С. А., Казанцев Н. Л., Сидоров А. В., Шевченко М. В. Клинические аспекты применения композитов для реставрации зубов // Новое в стоматологии. 1995. № 6. С. 326.
3. Левин Б. Оптические свойства реставраций, или что беспокоит пациентов? // ДентАрт. 2004. № 4. С. 30—33.
4. Пархамович С. Н., Тюкова Е. А., Минчук С. А. Оптическое восприятие композиционных реставраций в ультрафиолетовом свете // Современная стоматология. 2014. № 2. С. 77—79.
5. Луцкая И. К., Марченко Е. И., Чухрай И. Г. Эстетическое пломбирование некариозных дефектов твердых тканей зуба // Современная стоматология. 2012. № 1. С. 29—31.
6. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пурыев Д. Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
7. Шаламай Л. И., Кузьмина Д. А., Майоров Е. Е., Мендоса Е. Ю., Сакерина А. И., Нарушак Н. С. Исследование оптических свойств твердых тканей зуба и композитных материалов посредством фотометрического анализа // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. № 8. С. 11—17. DOI: 10.25791/pribor.08.2020.1196.
8. Кузьмина Д. А., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е., Писарева Е. А., Шаламай Л. И. Флуориметрия зубов *in vitro* и композитных материалов // MEDICUS. Международный медицинский научный журнал. 2020. № 6(36). С. 68—75.

9. Maiorov E. E., Prokopenko V. T., Ushveridze L. A. A system for the coherent processing of specklegrams for dental tissue surface examination // Biomedical Engineering. 2014. Vol. 47, N 6. P. 304—306. DOI: 10.1007/s10527-014-9397-2.
10. Прокопенко В. Т., Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Удахина С. В., Цыганкова Г. А., Хайдаров А. Г., Черняк Т. А. Оптико-электронный прибор для контроля геометрических параметров диффузно отражающих объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 5. С. 388—394. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-5-388-394.
11. Кузьмина Д. А., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е., Нарушак Н. С., Шаламай Л. И. Спектроскопия отражения тканей зубов *in vitro* и наногибридных реставрационных материалов // MEDICUS. Международный медицинский научный журнал. 2020. № 5(35). С. 68—73.
12. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Писарева Е. А. Исследование спектрофотометра ультрафиолетовой области длин волн для анализа спектров пропускания дисперсных сред // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 4. С. 357—365.
13. Майоров Е. Е., Туровская М. С., Литвиненко А. Н., Черняк Т. А., Дагаев А. В., Пономарев С. Е., Курлов В. В., Катунин Б. Д. Исследование разработанного спектрофотометра для ультрафиолетовой области спектра и его технико-экономическое обоснование // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 7. С. 38—43.
14. Maiorov E. E., Shalamay L. I., Dagaev A. V., Kirik D. I., Khokhlova M. V. An interferometric device for detecting subgingival caries // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53. P. 258—261. DOI: 10.1007/s10527-019-09921-0.
15. Кузьмина Д. А., Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Нарушак Н. С. Использование метода спектроскопии отражения для распознавания подлинности стоматологических реставрационных материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 1. С. 63—70. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-63-70.
16. Кузьмина Д. А., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е., Нарушак Н. С., Сакерина А. И., Шаламай Л. И. Экспериментальные исследования оптических свойств твердых тканей передних зубов и современных синтетических пломбировочных материалов // Стоматология для всех. 2020. № 4. С. 58—62. DOI: 10.35556/idr-2020-4(93)58-62.
17. Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Кузьмина Д. А., Мендоса Е. Ю., Нарушак Н. С., Сакерина А. И. Спектральный анализ стоматологического реставрационного материала и зубной ткани пациентов разных возрастных групп *in vitro* // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2020. № 8. С. 105—114.
18. Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Кузьмина Д. А., Майоров Е. Е. Исследование оптических свойств композитных материалов и твердых тканей зуба пациентов *in vitro* // Dental Forum. 2021. № 1. С. 3—6.
19. Кузьмина Д. А., Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е., Нарушак Н. С. Флуоресцентная спектроскопия для анализа пломбировочных материалов и твердых тканей зубов *in vitro* // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 7. С. 576—582. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-576-582.

Сведения об авторах

- | | |
|-------------------------------------|---|
| Людмила Ивановна Шаламай | — канд. мед. наук, доцент; Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, кафедра стоматологии терапевтической и пародонтологии; E-mail: l.shalamay@mail.ru |
| Евгений Евгеньевич Майоров | — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; E-mail: majorov_ee@mail.ru |
| Елена Юрьевна Мендоса | — Московский государственный медико-стоматологический университет имени А.И. Евдокимова, кафедра клинической стоматологии; ассистент; E-mail: mendosaMSUMD@gmail.com |
| Виктория Борисовна Лампусова | — канд. мед. наук, доцент; Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, кафедра стоматологии терапевтической и пародонтологии; E-mail: victoriala383@gmail.com |
| Наталья Сергеевна Оксас | — канд. мед. наук; Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, кафедра стоматологии терапевтической и пародонтологии; E-mail: gyvas@yandex.ru |

Поступила в редакцию 14.10.2021; одобрена после рецензирования 10.11.2021; принята к публикации 30.12.2021.

REFERENCES

1. Lutskaia I.K. *Prakticheskaya stomatologiya* (Practical Dentistry), Minsk, 1999, 360 p. (in Russ.)
2. Vinogradova T.V., Ugoleva S.A., Kazantsev N.L., Sidorov A.B., Shevchenko M.V. *Novoye v stomatologii*, 1995, no. 6, pp. 326. (in Russ.)
3. Levin B. *DentArt*, 2004, no. 4, pp. 30–33. (in Russ.)
4. Parkhamovich S.N., Tyukova E.A., Minchuk S.A. *Sovremennaya stomatologiya*, 2014, no. 2, pp. 77–79. (in Russ.)
5. Lutskaia I.K., Marchenko E.I., Chukhrai I.G. *Sovremennaya stomatologiya*, 2012, no. 1, pp. 29–31. (in Russ.)
6. Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryayev D.T. *Opticheskiye izmereniya* (Optical Measurements), Moscow, 1987, 264 p. (in Russ.)
7. Shalamay L.I., Kuzmina D.A., Maiorov E.E., Mendosa E.Yu., Sakerina A.I., Narushak N.S. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2020, no. 8, pp. 11–17, DOI: 10.25791/pribor.08.2020.1196. (in Russ.)
8. Kuzmina D.A., Mendoza E.Yu., Mayorov E.E., Pisareva E.A., Shalamay L.I. *MEDICUS*, 2020, no. 6(36), pp. 68–75. (in Russ.)
9. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. *Biomedical Engineering*, 2014, no. 6(47), pp. 304–306, DOI: 10.1007/s10527-014-9397-2.
10. Prokopenko V.T., Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Udakhina S.V., Tsygankova G.A., Khaidarov A.G., Chernyak T.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 5(59), pp. 388–394. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-5-388-394. (in Russ.)
11. Kuzmina D.A., Mendoza E.Yu., Maiorov E.E., Narushak N.S., Shalamay L.I. *MEDICUS*, 2020, no. 5(35), pp. 68–73. (in Russ.)
12. Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Pisareva E.A. *News of the Tula state university. Technical sciences*, 2018, no. 4, pp. 357–365. (in Russ.)
13. Maiorov E.E., Turovskaya M.S., Litvinenko A.N., Chernyak T.A., Dagaev A.V., Ponomarev S.E., Kurlov V.V., Katunin B.D. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2018, no. 7, pp. 38–43. (in Russ.)
14. Maiorov E.E., Shalamay L.I., Dagaev A.V., Kirik D.I., Khokhlova M.V. *Biomedical Engineering*, 2019, vol. 53, pp. 258–261, DOI: 10.1007/s10527-019-09921-0.
15. Kuzmina D.A., Maiorov E.E., Shalamay L.I., Mendosa E.Yu., Narushak N.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 1(64), pp. 63–70, DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-63-70 (in Russ.)
16. Kuzmina D.A., Mendoza E.Yu., Maiorov E.E., Narushak N.S., Sakerina A.I., Shalamay L.I. *Dentistry for everyone*, 2020, no. 4, pp. 58–62, DOI.org/10.35556/idr-2020-4(93)58-62. (in Russ.)
17. Maiorov E.E., Shalamay L.I., Kuzmina D.A., Mendosa E.Yu., Narushak N.S., Sakerina A.I. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2020, no. 8, pp. 105–114. (in Russ.)
18. Shalamay L.I., Mendoza E.Yu., Kuzmina D.A., Maiorov E.E. *Dental forum*, 2021, no. 1, pp. 3–6. (in Russ.)
19. Kuzmina D.A., Shalamay L.I., Mendosa E.Yu., Maiorov E.E., Narushak N.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 7(64), pp. 576–582, DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-576-582 (in Russ.)

Data on authors

Ludmila I. Shalamay	—	PhD, Associate Professor; Pavlov University, Department of Therapeutic Dentistry and Periodontology; E-mail: l.shalamay@mail.ru
Evgeny E. Maiorov	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: maiorov_ee@mail.ru
Elena Yu. Mendosa	—	A. I. Evdokimov State University of Medical and Dentistry, Department of Clinical Dentistry; Assistant; E-mail: mendosaMSUMD@gmail.com
Victoria B. Lampusova	—	PhD, Associate Professor; Pavlov University, Department of Therapeutic Dentistry and Periodontology; E-mail: victoriala383@gmail.com
Nataliya S. Oksas	—	PhD; Pavlov University, Department of Therapeutic Dentistry and Periodontology; E-mail: gyvas@yandex.ru

The article was submitted 14.10.2021; approved after reviewing 10.11.2021; accepted for publication 30.12.2021.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОТРАЖЕНИЯ
ПСЕВДОСЛУЧАЙНОГО СИГНАЛА ОТ ПОКРЫТИЯ
С УПРАВЛЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

А. П. Алёшкин*, В. М. Гусаков, В. Н. Цыкунов

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
*vka@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты имитационного моделирования процесса отражения сигнала типа М-последовательность от однослойного покрытия с управляемыми параметрами. Разработанная модель позволяет получить сигнал на выходе коррелятора радиолокационной станции без учета среды распространения. Моделирование процесса отражения псевдослучайного сигнала от покрытия с управляемыми параметрами показывает принципиальную возможность создания ложных точек отражения для радиолокационной станции без использования активных средств модификации дальностных портретов объектов.

Ключевые слова: покрытие, радиолокационная станция, М-последовательность, управляемые параметры, коррелятор

Ссылка для цитирования: Алёшкин А. П., Гусаков В. М., Цыкунов В. Н. Результаты моделирования процесса отражения псевдослучайного сигнала от покрытия с управляемыми параметрами // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 118—124. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-118-124.

RESULTS OF MODELING A PSEUDORANDOM SIGNAL REFLECTION FROM
A COATING WITH CONTROLLED PARAMETERS

A. P. Aleshkin*, V. M. Gusakov, V. N. Tsykunov

A. F. Mozhaisky Military Aerospace Academy, St. Petersburg, Russia
vka@mail.ru

Abstract. Results of modeling the process of the "M-sequence" type signal reflection from a single-layer coating with variable parameters are presented. The developed model makes it possible to obtain a signal at the output of the radar correlator without excluding the propagation medium. Modeling the process of reflection of pseudo-random signal from a single-layer coating with variable parameters demonstrates the fundamental possibility of creating false reflection points for radar without using active means of signal re-emission.

Keywords: coating, radar, M-sequence, controlled parameters, correlator

For citation: Aleshkin A. P., Gusakov V. M., Tsykunov V. N. Results of modeling a pseudorandom signal reflection from a coating with controlled parameters. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 2. P. 118—124 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-118-124.

В современных радиолокационных станциях (РЛС) в параметрах зондирующих сигналов помимо линейной частотной модуляции (ЛЧМ) указывается и фазовая манипуляция. Использование псевдослучайных сигналов наряду с ЛЧМ, несмотря на сложность и трудоемкость их обработки, связано с требованиями повышения точности функционирования РЛС в режимах высокого разрешения, так как в этом случае ЛЧМ-сигналам присуща неоднознач-

ность по дальности из-за наличия нескольких корреляционных пиков при приеме отраженного сигнала от движущихся объектов [1].

В статье представлены результаты моделирования процесса приема сигнала типа М-последовательность, отраженного от однослойного покрытия с изменяемой диэлектрической проницаемостью на металлическом экране.

В качестве покрытий с переменной диэлектрической проницаемостью возможно применение тонких сегнетоэлектрических пленок, на которых уже создаются различные СВЧ-элементы [2, 3], ферритовых покрытий или материалов с отрицательной диэлектрической проницаемостью (метаматериалов) [4, 5]. Примеры покрытий в статье не приводятся, также не учитываются ослабление сигнала по трассе распространения и помеховая обстановка.

В качестве исходных данных для моделирования приняты:

- длительность одного импульса — 10 нс;
- число импульсов в сигнале — 63;
- стартовая последовательность — „11011110“;
- центральная частота — 10 ГГц;
- диапазон изменения диэлектрической проницаемости — 2—10;
- толщина покрытия 1—5 мм;
- покрытие расположено перпендикулярно распространению Н-поляризованной волны.

Моделирование процесса отражения псевдослучайного сигнала от покрытия с управляемыми параметрами происходит в несколько этапов. На первом этапе генерируется двоичная последовательность, необходимая для формирования зондирующего сигнала. Для генерации М-последовательности с периодом $M=2^n-1$ используется примитивный полином степени n . Примеры полиномов приведены в таблице [6].

Примитивные полиномы

n	M	Полином	n	M	Полином
1	1	$x+1$	9	511	x^9+x^4+1
2	3	x^2+x+1	10	1023	$x^{10}+x^3+1$
3	77	x^3+x+1	11	2047	$x^{11}+x^2+1$
4	15	x^4+x+1	12	4095	$x^{12}+x^6+x^4+x+1$
5	31	x^5+x^2+1	13	8191	$x^{13}+x^4+x^3+x+1$
6	63	x^6+x+1	14	16383	$x^{14}+x^{10}+x^6+x+1$
7	127	x^7+x^3+1	15	32767	$x^{15}+x+1$
8	255	$x^8+x^4+x^3+x^2+1$	16	65535	$x^{16}+x^{12}+x^3+x+1$

Пример генератора для последовательности длиной 15 символов на основе примитивных полиномов представлен на рис. 1.

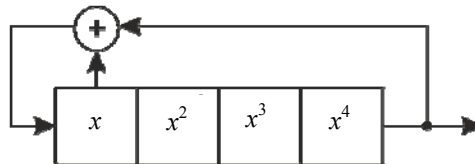


Рис. 1

Далее в соответствии с полученной последовательностью формируются дискретные отсчеты видеосигнала $S(t)$ без постоянной составляющей и шкала времени с дискретностью, кратной двум. Дискретность выбирается таким образом, чтобы выполнялись условия теоремы Котельникова для сформированного на основе видеосигнала $S(t)$ зондирующего радиосигнала с частотой f_0 .

В ходе моделирования для сигнала с длительностью отдельного импульса 10 нс и длиной последовательности 63 символа на частоте 10 ГГц дискретность отсчетов составила 16384, при этом частота дискретизации превышала верхнюю частоту спектра в 2,5 раза.

На следующем этапе на каждый отсчет сформированной шкалы времени рассчитывается зондирующий фазоманипулированный сигнал [7]:

$$U(t) = U_0 \cos \left[2\pi f + \frac{\pi}{2} S(t) \right].$$

На третьем этапе производится расчет параметров покрытия также на каждый момент времени.

В качестве лоцируемого объекта используется однослойное диэлектрическое покрытие на металлическом основании, для которого предусмотрена возможность управления диэлектрической проницаемостью. Электродинамическая модель покрытия представлена на рис. 2.

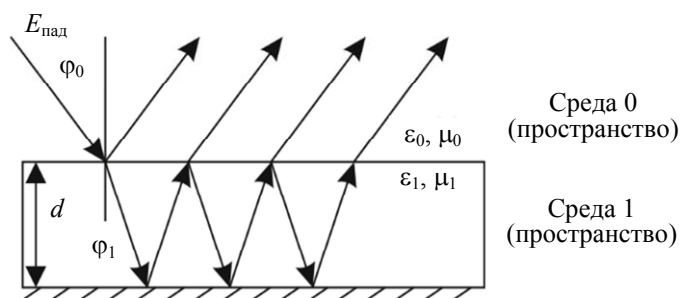


Рис. 2

Коэффициент отражения рассчитывается методом обобщенных матриц рассеяния и для случая нормального падения имеет следующий вид [8—10]:

$$R = R_0 + \frac{D_0 D_1 (\pm 1) e^{i2kd}}{1 - (\pm 1) R_1 e^{i2kd}}, \quad (1)$$

где D_0, D_1 — коэффициенты прохождения из среды 0 в среду 1 и обратно; R_0, R_1 — коэффициенты отражения из среды 0 в среду 1 и обратно; d — расстояние, которое проходит волна в диэлектрике между границами разделов сред; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

Коэффициенты отражения рассчитываются с использованием аппарата волновых сопротивлений по формуле [8, 11]:

$$R = \frac{Z_{\text{BX}} - Z_{\text{ВЫХ}}}{Z_{\text{BX}} + Z_{\text{ВЫХ}}},$$

где Z_{BX} — волновое сопротивление среды, из которой распространяется волна; $Z_{\text{ВЫХ}}$ — волновое сопротивление среды, в которую проходит волна.

Экспонента в формуле (1) характеризует фазовые набегі при прохождении в области 1.

Множитель „–1“ в формуле появляется в случае Е-поляризации (вектор **Е** параллелен плоскости слоя), так как для идеального проводника коэффициент отражения равен „–1“.

Так как ширина спектра излучаемого сигнала составляет 200 МГц, при анализе его отражения от покрытия дисперсия сигнала может не учитываться. В этом случае влияние характера изменения параметров покрытия на сигнал учитывается следующим образом:

- изменение модуля коэффициента отражения проявляется в виде амплитудной модуляции зондирующего радиосигнала;
- изменение набега фазы коэффициента отражения учитывается в виде фазовой модуляции исходного радиосигнала.

Таким образом, на каждый отсчет сформированной шкалы времени отраженный сигнал может быть представлен в виде [12]:

$$U_{\text{отр}}(t) = U_0 \times |K_{\text{покр}}(t)| \times \cos \left[2\pi f + \frac{\pi}{2} S(t) + \arg(K_{\text{покр}}(t)) \right],$$

где $K_{\text{покр}}(t)$ — комплексный коэффициент отражения от покрытия.

Внешний вид взаимной корреляционной функции (ВКФ) зондирующего и отраженного сигналов в случае, когда управление параметрами покрытия отсутствует, представлен на рис. 3.

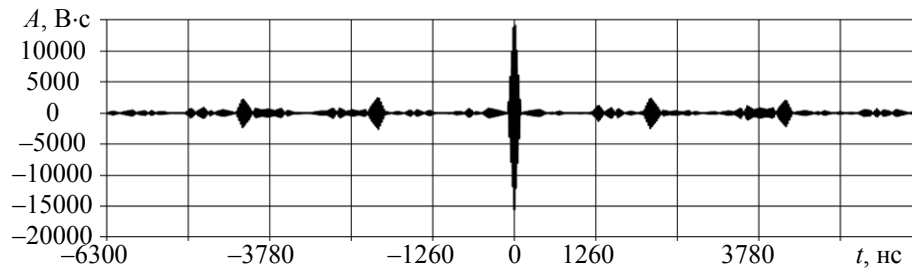


Рис. 3

Функция имеет один ярко выраженный корреляционный пик.

На рис. 4, а представлена ВКФ зондирующего и отраженного сигналов для случая управления диэлектрической проницаемостью покрытия по гармоническому закону с частотой 1 МГц и толщиной покрытия 1 мм.

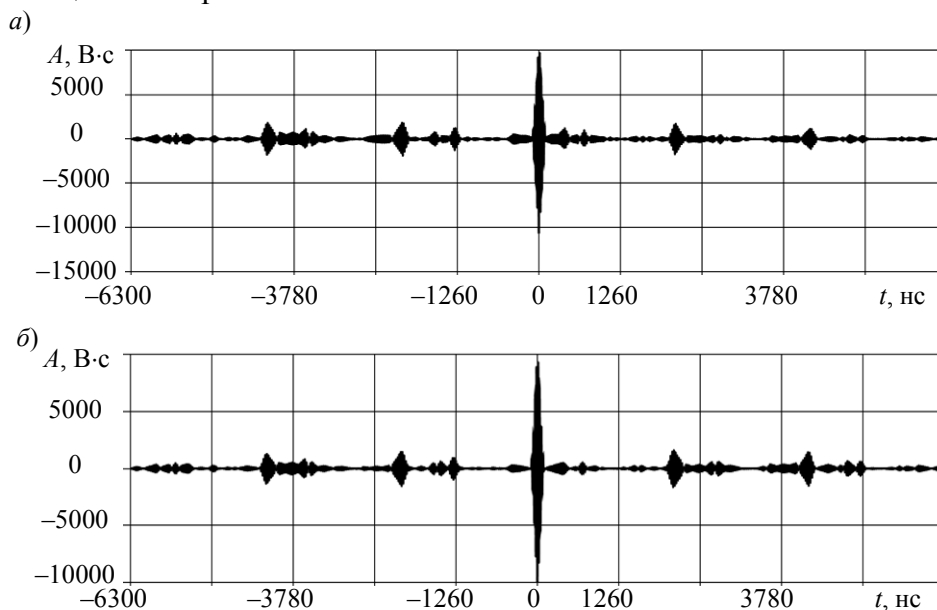


Рис. 4

Как видно из рисунка, высота пика уменьшилась на 30 % и появились дополнительные боковые всплески. В целом изменение параметров покрытия не повлияло на определение дальности до точки отражения. Увеличение частоты управления до 100 МГц (рис. 4, б) также не приводит к заметному изменению ВКФ.

На рис. 5 представлены результаты расчета ВКФ в случае управления диэлектрической проницаемостью покрытия по гармоническому закону с частотами 1 (а) и 100 МГц (б) и толщиной покрытия 5 мм.

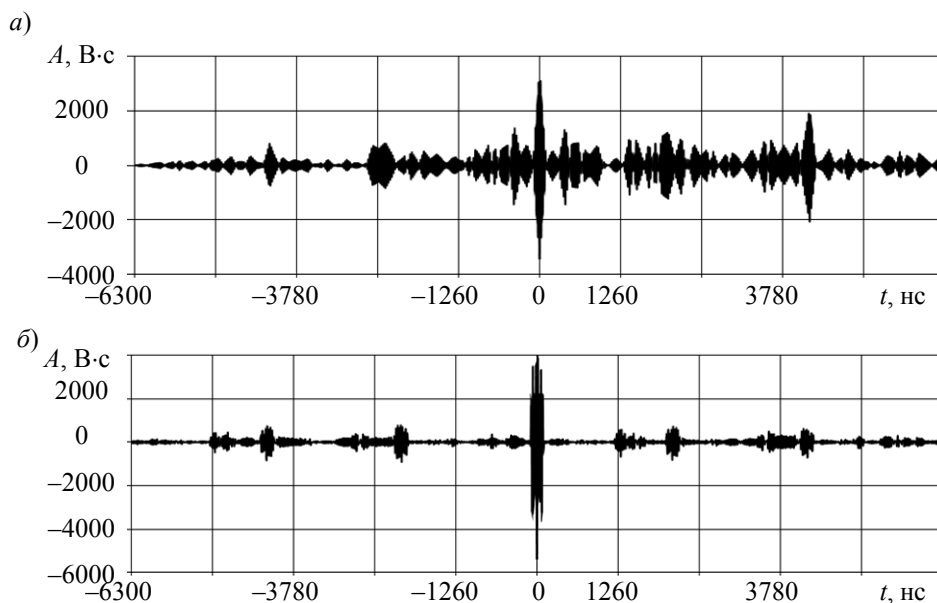


Рис. 5

В первом случае уровни боковых корреляционных всплесков соизмеримы с главным пиком. Во втором случае наблюдается размытие главного пика. В обоих случаях уровень главного пика уменьшился в пять раз относительно пика, представленного на рис. 3.

Полученные результаты соответствуют данным исследования фазоманипулированных сигналов, описанным в [1, 13]: М-последовательность имеет нулевую зону автокорреляции только при полном согласовании фильтра с эхо-сигналом по частоте, иначе вблизи основного пика автокорреляционной функции появляются боковые лепестки.

В рассматриваемом случае медленно меняющаяся по гармоническому или пилообразному закону диэлектрическая проницаемость покрытия приводит к смещению частоты заполнения отраженного радиоимпульса, что и вызывает появление боковых составляющих ВКФ. Уменьшение амплитуды основного корреляционного пика при этом можно трактовать как снижение уровня сигнала. При этом для эффективного управления параметрами покрытия частота управляющего сигнала находится в пределах 1—10 МГц, что реализуемо современными системами управления.

Таким образом, результаты моделирования процесса отражения сигнала типа М-последовательность от среды с управляемыми параметрами показывают принципиальную возможность создания мнимых точек отражения для РЛС в режимах высокого разрешения без использования активных средств модификации дальностных портретов объектов [14, 15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баскаков А. И., Ипанов Р. Н., Комаров А. А. Фазокодоманипулированные радиолокационные сигналы для точного определения дальности и скорости малоразмерных космических объектов // Журнал радиоэлектроники. 2018. Вып. 12 [Электронный ресурс]: <<http://jre.cplire.ru/jre/dec18/7/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2018.12.7>.
2. Фирсенков А. И., Велькин Д. В., Сквородников С. В. и др. Электрически управляемые сэндвич-конденсаторы на многослойных сегнетоэлектрических плёнках // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2018. Т. 1. С. 34—38.
3. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая миля. 2010. Т. 18—19, № 3—4. С. 44—60.
4. Лагарьков А. Н., Кисель В. Н., Семененко В. Н. Радиопоглощающие материалы на основе метаматериалов // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57, № 10. С. 1122—1129.

5. Лагарьков А. Н., Кисель В. Н. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 1. С. 10—20.
6. Захаров И. Д., Ожиганов А. А. Использование порождающих полиномов М-последовательностей при построении псевдослучайных кодовых шкал // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 6. С. 49—55.
7. Зернов Н. В., Юрков Ю. А., Джунь В. И. Теория радиотехнических цепей и сигналов. Л.: МО, 1990.
8. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973
9. Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В. Электромагнитные поля и волны. М.: Советское радио, 1971. 664 с.
10. Алешкин А. П., Иванов А. А., Гусаков В. М., Семенов А. А. Результаты моделирования работы РЛС при отражении сигнала от покрытия с управляемыми параметрами // Вестник метролога. 2020. № 2. С. 21—23.
11. Гусаков В. М., Москалев В. М., Невзоров В. И. Обзор подходов к определению угла прохождения электромагнитной волны через границу воздух—диэлектрик с потерями // СПБНТОРЭС: тр. ежегодной НТК. 2020. № 1(75). С. 12—13.
12. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2003.
13. Ипанов Р. Н. Полифазные когерентные дополнительные сигналы // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 1 [Электронный ресурс]: <<http://jre.cplire.ru/jre/jan17/14/text.pdf>>.
14. Галеницкий А. В., Глущенко Л. А., Разжев А. В. и др. Экспериментальная отработка устройств модификации радиолокационных дальностных портретов объектов // Специальная техника. 2016. № 5. С. 2—6.
15. Перунов Ю. М., Фомичев К. И., Юдин Л. М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием. М.: Радиотехника, 2003. 416 с.

Сведения об авторах

- | | |
|-------------------------------------|---|
| Андрей Петрович Алёшкин | — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru |
| Виктор Михайлович Гусаков | — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; докторант; E-mail: vka@mil.ru |
| Владислав Николаевич Цыкунов | — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; преподаватель; E-mail: vka@mil.ru |

Поступила в редакцию 25.10.2021; одобрена после рецензирования 12.11.2021; принята к публикации 30.12.2021.

REFERENCES

1. <http://jre.cplire.ru/jre/dec18/7/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2018.12.7. (in Russ.)
2. Firsenskov A.I., Vel'kin D.V., Skovorodnikov S.V. et al. *Elektronika i mikroelektronika SVCH* (Electronics and Microelectronics Microwave), 2018, vol. 1, pp. 34—38. (in Russ.)
3. Slyusar V. *Pervaya milya*, 2010, no. 3-4(18-19), pp. 44—60. (in Russ.)
4. Lagar'kov A.N., Kisel' V.N., Semenenko V.N. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2012, no. 10(57), pp. 1122—1129.
5. Lagar'kov A.N., Kisel' V.N. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 2018, no. 1, pp. 10—20. (in Russ.)
6. Zakharov I.D., Ozhiganov A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, no. 6(54), pp.49—55. (in Russ.)
7. Zernov N.V., Yurkov Yu.A., Dzhun V.I. *Teoriya radiotekhnicheskikh tsepey i signalov* (Theory of Radio Circuits and Signals), Leningrad, 1990. (in Russ.)
8. Brekhovskikh L.M. *Volny v sloistyykh sredakh* (Waves in Layered Media), Moscow, 1973. (in Russ.)
9. Gol'dshteyn L.D., Zernov N.V. *Elektromagnitnyye polya i volny* (Electromagnetic Fields and Waves), Moscow, 1971, 664 p. (in Russ.)
10. Aleshkin A.P., Ivanov A.A., Gusakov V.M., Semenov A.A. *Vestnik metrologa*, 2020, no. 2, pp. 21—23. (in Russ.)
11. Gusakov V.M., Moskaev V.M., Nevzorov V.I. *SPbNTORES*, Proceedings of the Conference, 2020, no. 1(75), pp. 12—13. (in Russ.)
12. Baskakov S.I. *Radiotekhnicheskiye tsepi i signaly* (Radio Circuits and Signals), Moscow, 2003. (in Russ.)
13. <http://jre.cplire.ru/jre/jan17/14/text.pdf>. (in Russ.)
14. Galenitsky A.V., Glushchenko L.A., Razhev A.V., Neyelov V.V., Terentyev A.M., Samorodov B.A., Fedorov M.A.

Spetsial'naya tekhnika, 2016, no. 5, pp. 2–6. (in Russ.)

15. Perunov Yu.M., Fomichev K.I., Yudin L.M. *Radioelektronnnoye podavleniye informatsionnykh kanalov sistem upravleniya oruzhiyem* (Electronic Jamming of Information Channels of Weapon Control Systems), Moscow, 2003, 416 p. (in Russ.)

Data on authors

- | | | |
|------------------------------|---|--|
| Andrey P. Aleshkin | — | Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Aerospace Academy, Faculty of Radioelectronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru |
| Viktor M. Gusakov | — | PhD; A. F. Mozhaisky Military Aerospace Academy, Faculty of Radioelectronic Systems of Space Complexes; Doctoral Student; E-mail: vka@mil.ru |
| Vladislav N. Tsykunov | — | PhD; A. F. Mozhaisky Military Aerospace Academy, Faculty of Radioelectronic Systems of Space Complexes; Lecturer; E-mail: vka@mil.ru |

The article was submitted 25.10.2021; approved after reviewing 12.11.2021; accepted for publication 30.12.2021.

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ДИСКОВОЙ АНТЕННЫ КРУГОВОГО ОБЗОРА
МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА
ДЛЯ ДАТЧИКОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА**

В. П. Заярный^{1*}, Е. И. Нефёдов², Ю. И. Сидякин¹, И. Н. Пономарев³, Д. В. Заярный¹

¹Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия
*zvp2000@mail.ru

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязино, Московская обл., Россия

³Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия

Аннотация. Описана оптимизированная конструкция дисковой антенны, обеспечивающей круговой (или секторный) обзор в составе датчиков видеонаблюдения (азимутальное перемещение объектов, охранные системы и т.д.). Приведены рассчитанные и измеренные диаграммы направленности излучателей, определяемые их конструктивными особенностями. Эти результаты позволили поэтапно оптимизировать конструкцию антенны, представляющей собой систему из двух идентичных дисков с четырьмя излучателями осевого излучения на каждом диске, идущими радиально от центров. Угол между соседними излучателями на диске составляет 90°. Диски расположены соосно, при этом они азимутально смещены относительно друг друга на угол 45°, что обеспечивает полный круговой или любой секторный обзор в азимутальной плоскости. Для такой конструкции антенны возможно также частотное разделение излучателей. Экспериментально установлено оптимальное расстояние между дисками, обеспечивающее наилучшее (минимальное) перекрытие главных лучей диаграмм направленности излучателей и их электродинамическую развязку, равное длине волны излучения λ для центральной частоты $f_0=10$ ГГц ($\lambda=3$ см). Рабочий диапазон частот антенны 8—12 ГГц.

Ключевые слова: датчик, круговой обзор, антенна, излучатель, диаграмма направленности, сверхбыстрая обработка информации

Ссылка для цитирования: Заярный В. П., Нефёдов Е. И., Сидякин Ю. И., Пономарев И. Н., Заярный Д. В. Оптимизация конструкции дисковой антенны кругового обзора микроволнового диапазона для датчиков, содержащих приемно-передающие устройства // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 125—131. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-125-131.

**OPTIMIZATION OF MICROWAVE CIRCULAR-VIEW DISC ANTENNA DESIGN
FOR SENSORS CONTAINING TRANSCEIVERS**

V. P. Zayarnyi*, E. I. Nefyodov, Yu. I. Sidiyakin, I. N. Ponomarev, D. V. Zayarnyi

¹Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia
zvp2000@mail.ru

²V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS,
Fryazino, Moscow region, Russia

³Volgograd State University, Volgograd, Russia

Abstract. An optimized design of a disk antenna is described, which provides a circular (or sector) view as part of video surveillance sensors (azimuthal movement of objects, security systems, etc.). Theoretically calculated and experimentally measured radiation patterns of the emitters determined by their design features, are presented. The results allow to optimize gradually design of the all-round looking antenna, which is a system of two identical discs with four axial emitters on each disc extending radially from the discs centers. The angle between adjacent radiators on the disk is 90°. The disks are located coaxially, while they have an azimuthal offset relative to each other at an angle of 45°, which provides a full circular or any sector view in the azimuthal plane. For this antenna design, frequency separation of the radiators is also possible. Experimentally determined optimal distance between the disks providing the best (minimum) overlap of the main beams of the radiation patterns of the radiators and their electrodynamic decoupling, equals to the radiation wavelength λ for the central frequency $f_0 = 10$ GHz ($\lambda = 3$ cm). The operating frequency range of the antenna is 8-12 GHz.

Keywords: sensor, all-round view, antenna, emitter, directional pattern, ultra-fast information processing

For citation: Zayarnyi V. P., Nefyodov E. I., Sidyakin Yu. I., Ponomarev I. N., Zayarnyi D. V. Optimization of microwave circular-view disc antenna design for sensors containing transceivers. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 2. P. 125—131 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-125-131.

Известно, что первичные измерительные преобразователи (ПИП), или датчики, являются важнейшей составной частью информационно-измерительных систем, обеспечивающих первичное преобразование измеряемых физических величин к виду, удобному для дальнейшего преобразования и ввода в процессорное средство. В настоящей работе представлена дисковая антенна кругового обзора (АКО) в составе датчиков видеонаблюдения (азимутальное перемещение объектов, охранные системы и т.д.), у которой путем оптимизации конструкции (угла раскрытия у излучателей направленного — осевого — излучения и расстояния между дисками) достигалось наилучшее (минимальное) перекрытие главных лучей диаграмм направленности (ДН) излучателей, обеспечивающее полный круговой или секторный обзор пространства, при сохранении надежности и простоты конструкции АКО. Возможность изменения размеров дисков позволяет разрабатывать АКО для различных устройств этого же класса, в том числе требующих уменьшения размеров, например АКО с минимальным радиусом дисков (до 3 см), востребованные в системах сверхбыстрой обработки информации [1—3].

Описанные, например в [4—6], варианты подобных антенных систем имеют ряд недостатков. Прежде всего, это сложность и жесткость конструкции, не позволяющие оптимизировать форму диаграмм направленности излучателей, регулировать частотный диапазон (что необходимо выполнять при разработке предлагаемой АКО, а при наличии слоя диэлектрика в нем также имеет место потеря энергии).

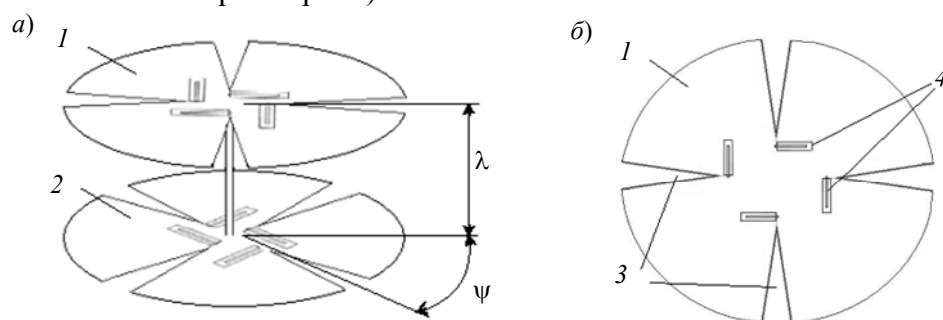


Рис. 1

Общий вид разработанной АКО приведен на рис. 1, а. Она содержит диски 1 и 2 (на рис. 1, б представлен один диск) толщиной 0,3—0,5 мм и радиусом 10,5 см. Расположенные соосно на металлическом стержне диаметром 0,5 см диски выполнены из металла с высокой электропроводностью (медь, алюминий). На дисках имеются излучатели электромагнитного поля 3 в виде линейно расширяющихся щелевых линий и выполненные из медной фольги полосковые линии 4 длиной $2,5\lambda$ (λ — длина волны излучения), шириной 2 мм, предназначенные для согласования излучателей с питающим фидером. Диски 1 и 2 развернуты азимутально относительно друг друга на угол $\psi = 45^\circ$ (рис. 1, а), а угол между соседними излучателями на каждом диске составляет 90° (рис. 1, б).

Предложенная антенна кругового обзора работает следующим образом. При подаче СВЧ-сигнала через полосковые линии 4, являющиеся широкополосными линиями связи с плавным переходом для уменьшения паразитного излучения, в щелях 3 возбуждается электромагнитное поле, которое, проходя вдоль этих щелей, излучается в окружающее пространство, образуя соответствующие диаграммы направленности (ДН). Для обеспечения электродинамической развязки по частоте к излучателям на дисках 1 и 2 возможно подводить сигнал на разных частотах в рабочем диапазоне (8—12 ГГц). При этом диаграммы направленности в электродинамических плоскостях E и H остаются практически неизменными в указанном

частотном диапазоне. Изменение геометрических размеров щелей 3, угла их раскрытия и полосковых линий 4 позволяет регулировать форму ДН излучателей и частотный диапазон излучения.

Наиболее важные электродинамические свойства одиночного излучателя (рис. 2, 1 — симметричная щелевая линия; 2 — линейно расширяющийся раскрыв; 3 — питающая микрополосковая линия; 4 — коаксиальный разъем), на основе которого создавалась АКО, теоретически и экспериментально уже исследовались авторами. Результаты исследований [7—10] получены для излучателей, у которых ширина главного луча ДН регулировалась изменением длины L и угла раскрытия α излучателя (рис. 2). При этом угол раскрытия излучателя изменялся в пределах 30—120°. Для проектируемой АКО длина всех излучателей была одинаковой $L=3\lambda=9$ см (на центральной частоте рабочего диапазона $f_0=10$ ГГц, длина волны $\lambda=3$ см).

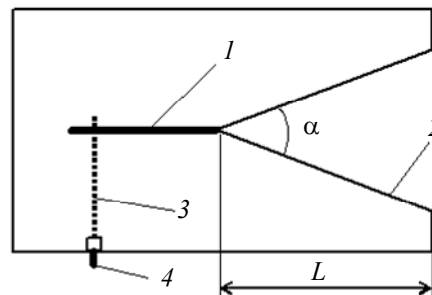


Рис. 2

Расчетные ДН строились согласно модельным представлениям, разработанным в [7, 10—15]. Из анализа геометрического расположения главных лучей ДН, полученных для указанных выше углов раскрытия излучателей, следует, что для обеспечения полного кругового обзора окружающего пространства в азимутальной плоскости достаточно расположить конструктивно вокруг диска восемь излучателей в радиальных от его центра направлениях. Следовательно, ширина ДН каждого излучателя по половинной мощности должна быть порядка 45°. Однако для обеспечения указанной ширины ДН угол раскрытия излучателей должен быть порядка 60°, что конструктивно обеспечить невозможно (из геометрических представлений видно, что угол раскрытия для каждого из восьми излучателей не должен превышать 45°). Эксперимент показал, что для указанного предельного значения угла раскрытия излучателей ($\alpha=45^\circ$) размещение восьми излучателей на одном диске создает неприемлемое перекрытие главных лучей их ДН. Это приводит к недопустимому искажению общей ДН АКО и не обеспечивает приемлемую электродинамическую развязку по частоте для соседних излучателей, работающих на разных частотах.

Обеспечить требуемый угол раскрытия излучателей ($\alpha=60^\circ$) позволяет размещение на одном диске четырех излучателей (рис. 1, б). При этом достигается наилучшее пространственное и частотное разделение ДН излучателей, позволяющее считать их практически независимыми.

Расчетная ДН (нормированная по мощности) для одного такого излучателя, имеющего длину $L=9$ см и угол раскрытия $\alpha=60^\circ$ в электродинамических плоскостях E (угол θ) и H (угол φ), приведена на рис. 3 (вследствие симметрии ДН в обеих электродинамических плоскостях на рис. 3 изображены только их половины). Из рис. 3 видно, что ширина главного луча ДН по половинной мощности в плоскостях E и H для данной конструкции излучателей практически одинакова и равна 52°.

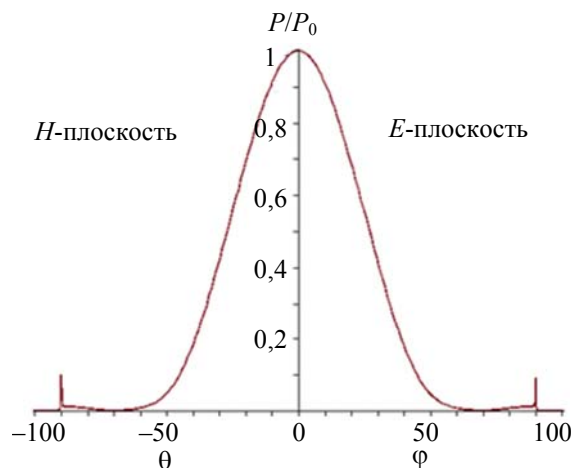


Рис. 3

Экспериментально измеренная и нормированная по мощности ДН излучателей для образцов, имевших такие же геометрические параметры, как и расчетные ($L=9$ см, $\alpha=60^\circ$), приведена на рис. 4. Ее измерения производились также в электродинамических плоскостях E и H на установке [7, 16], модернизированной для проведения данного эксперимента. Измерения производились также на центральной частоте указанного частотного диапазона $f_0=10$ ГГц. Из рис. 4 видно, что ДН имеют ширину главного луча по половинной мощности порядка 50° в плоскости E и 53° — в плоскости H , что хорошо согласуется с шириной расчетных ДН. Боковые лепестки ДН обусловлены, вероятнее всего, неидеальной формой исследовавшихся излучателей и наличием отражения от стенок измерительной камеры. Их уровень мог достигать значений 0,47 от уровня максимальной мощности излучения, но не превышал значения 0,5.

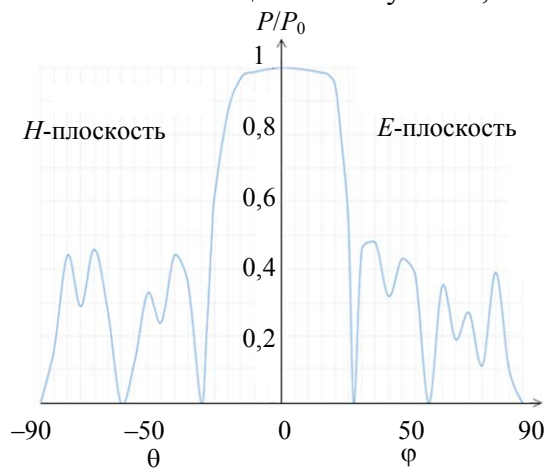


Рис. 4

Измеренная результирующая ДН для четырех излучателей на одном диске, построенная в радиальной системе координат (в логарифмическом масштабе), приведена на рис. 5. Из рисунка видно, что эта конструкция обеспечивает хорошее пространственное разделение главных лучей ДН, но не обеспечивает перекрытия окружающего пространства (и даже достаточно широкого сектора). Этот недостаток устраняется в конструкции, представляющей собой два подобных, соосно расположенных диска, азимутально смещенных друг относительно друга на угол $\psi = 45^\circ$ (рис. 1, а). Такая конструкция обеспечивает наилучшее пространственное и частотное разделение лучей общей ДН АКО в случае работы излучателей на разных частотах, что, в свою очередь, обеспечивает полный круговой и любой секторный обзор окружающего пространства в азимутальной плоскости. Экспериментально установлено, что оптимальное расстояние между дисками, обеспечивающее требуемое минимальное перекрытие

лучей ДН и электродинамическую развязку по частоте между излучателями верхнего и нижнего дисков АКО, составляет порядка одной длины волны (для данного случая $\lambda = 3$ см).

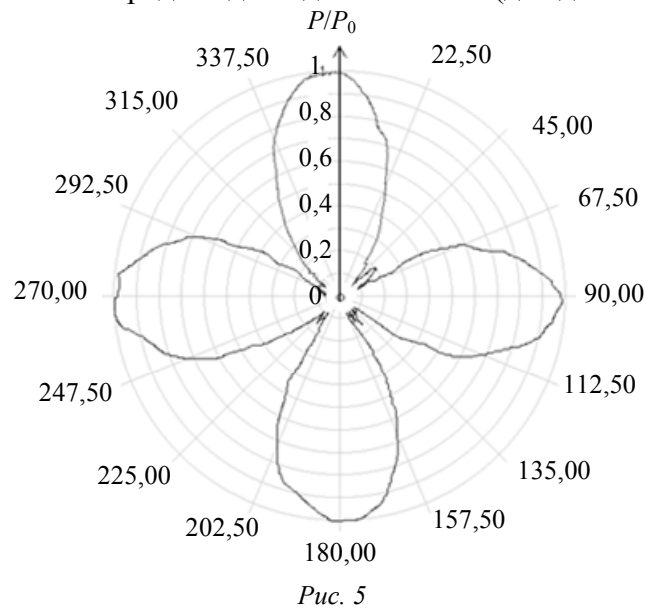


Рис. 5

При исследовании диаграмм направленности данной АКО в рабочем диапазоне частот (8—12 ГГц) выявлено, что для заданной геометрии излучателей их ДН в обеих электродинамических плоскостях (как в E -, так и в H -плоскости) существенно не изменялись, и по своим параметрам были близки к ДН, приведенным на рис. 3 и 4 для частоты $f_0 = 10$ ГГц. За пределами указанного диапазона частот проявлялись существенные искажения формы диаграмм направленности излучателей. Их следовало ожидать, поскольку полосковое питание обладает недостаточной широкополосностью, а использовавшиеся детектирующие СВЧ-сигнал диоды имеют ограниченный рабочий диапазон частот. Необходимость расширения частотного диапазона может быть достигнута заменой указанных элементов на более широкополосные.

С учетом изложенного общую диаграмму направленности всей АКО можно представить в виде восьми лучей, четыре из которых формируются излучателями верхнего диска, рис. 1, а (их ДН приведена на рис. 5), и четыре — идентичными излучателями нижнего диска, азимутально смещенными на угол $\psi = 45^\circ$. Обоснованные и выбранные геометрические параметры излучателей, их расположение на дисках и расстояние между дисками позволяют оптимальным образом сформировать практически независимые ДН каждого излучателя, охватывающие все окружающее пространство в азимутальной плоскости, или отдельные его секторы.

Разработанная АКО представляет собой передающую часть ПИП, индивидуально к каждому излучателю которой подводится СВЧ-сигнал (немодулированный или с импульсной или иной модуляцией) в частотном диапазоне 8—12 ГГц. Приемная часть ПИП представляет собой одну или несколько приемных антенн (в нашем случае — рупорные антенны), обеспечивающих устойчивый прием сигнала от АКО в любой точке азимутального пространства для кругового или секторного обзора в указанном частотном диапазоне. Дальнейшая обработка сигнала может производиться с применением процессорных средств или без них, в зависимости от решаемой задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nefyodov E. I., Smolsky S. M. Electromagnetic fields and waves. Microwaves and mmwave engineering with generalized macroscopic electrodynamics. NY: Springer, 2019. 360 p.
2. Nefyodov E. I., Smolsky S. M. Understanding of electrodynamics, radio wave propagation and antennas: Lecture course for students and engineers. Wuhan: Scientific Research Publishing, 2012. 449 p.

3. Вайнер Ю. А., Гураль И. М., Коняшенко Е. А. и др. // Антенны / Под ред. А. А. Пистолькорса. М.: Связь, 1980. Вып. 28. С. 95.
4. Пат. РФ 2047249. Антенна / В. И. Гвоздев, С. В. Гирич, И. Н. Пономарев. 1995. БИ № 30.
5. Пат. РФ 103676. Антенна кругового обзора / А. А. Фролов, В. С. Гирич, В. П. Заярный. Заявл. 20 апреля 2011 г.
6. Фролов А. А., Гирич С. В., Заярный В. П. Антенна кругового обзора сверхвысокочастотного диапазона // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 10—11. С. 697—703.
7. Фролов А. А., Гирич С. В., Заярный В. П. Изучение электродинамических характеристик антенн и антенных систем СВЧ диапазона // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 4. С. 328—335.
8. Заярный В. П., Парпула С. А., Гирич В. С., Пономарев И. Н. Изучение влияния угла раскрытия плоских коротких щелевых антенн микроволнового диапазона на их характеристики // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 6. С. 529—534.
9. Заярный В. П., Нефёдов Е. И., Пономарев И. Н. Особенности электродинамических характеристик симметричных щелевых линий на проводящей бесконечной полуплоскости в микроволновом диапазоне // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 4. С. 274—279.
10. Нефёдов Е. И., Заярный В. П., Пономарев И. Н. Теоретическое и экспериментальное исследование электродинамических свойств плоских щелевых антенн микроволнового диапазона // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66, № 4. С. 365—372.
11. Нефёдов Е. И., Пономарев И. Н., Заярный В. П. Исследование излучательной способности идеально проводящей полуплоскости, которая возбуждается перпендикулярной ее краю щелью // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 5. С. 384—395.
12. Марков Г. Т., Чаплин А. Ф. Возбуждение электромагнитных волн. М.: Энергия, 1967. 376 с.
13. Ufimtsev P. Ya. Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction. John Wiley & Sons, 2007. 329 p.
14. Janaswamy R. An accurate moment method model for the tapered slot antenna // IEEE Trans. on AP. 1989. Vol. 37, N 12. p. 1523—1528.
15. Janaswamy R., Shaubert D. H., Pozar D. M. Analysis of the transverse electromagnetic mode linearly tapered slot antenna // Radio Science. 1986. Vol. 21, N 5. P. 797—804.
16. Заярный В. П. Радиофизические свойства твердотельных слоистых структур с зарядовой связью: методы и информационные возможности для их определения. М.: Радио и связь, 2001. 212 с.

Сведения об авторах

- | | |
|-------------------------------------|---|
| Вячеслав Петрович Заярный | — д-р техн. наук, профессор; Волгоградский государственный технический университет, кафедра физики; E-mail: zvp2000@mail.ru |
| Евгений Иванович Нефёдов | — д-р физ.-мат. наук, профессор; Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, лаборатория исследования СВЧ свойств ферромагнетиков; E-mail: nefyodov32@mail.ru |
| Юрий Иванович Сидякин | — д-р техн. наук, профессор; Волгоградский государственный технический университет, кафедра технологии машиностроения |
| Игорь Николаевич Пономарев | — Волгоградский государственный университет, кафедра телекоммуникационных систем; ст. преподаватель, E-mail: ponomarev.igor@volsu.ru |
| Дмитрий Вячеславович Заярный | — магистрант; Волгоградский государственный технический университет, кафедра технологии машиностроения |

Поступила в редакцию 21.10.2021; одобрена после рецензирования 06.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

REFERENCES

1. Nefyodov E.I., Smolsky S.M. *Electromagnetic Fields and Waves. Microwaves and Mmwave Engineering with Generalized Macroscopic Electrodynamics*, NY, Springer, 2019, 360 p.
2. Nefyodov E.I., Smolsky S.M. *Understanding of Electrodynamics, Radio Wave Propagation and Antennas: Lecture Course for students and engineers*, Wuhan, Scientific Research Publishing, 2012, 449 p.
3. Vainer Yu.A., Gural I.M., Konyashenko E.A. et al. *Antenny* (Antennas), A.A. Pistolkors, ed., Moscow, 1980, no. 28, pp. 95. (in Russ.)
4. Patent RU 2047249, *Antenna* (Antenna), V.I. Gvozdev, S.V. Girich, I.N. Ponomarev, Published 1995, Bulletin 30. (in Russ.)

5. Patent RU 103676, *Antenna krugovogo obzora* (Surround Antenna), A.A. Frolov, V.S. Girich, V.P. Zayarny, Priority 20 April 2011. (in Russ.)
6. Frolov A.A., Girich S.V., Zayarny V.P. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2013, no. 10-11(55), pp. 629-633.
7. Frolov A.A., Girich S.V., Zayarny V.P. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2009, no. 4(52), pp. 297-304.
8. Zayarny V.P., Parpula S.A., Girich V.S., Ponomarev I.N. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2016, no. 6(59), pp. 479-483.
9. Zayarny V.P., Nefedov E.I., Ponomarev I.N. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2018, no. 4(61), pp. 281-285.
10. Nefedov E.I., Zayarny V.P., Ponomarev I.N. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2021, no. 4(66), pp. 420-426.
11. Nefedov E.I., Ponomarev I.N., Zayarny V.P. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2021, no. 5(64), pp. 384-395. (in Russ.)
12. Markov G.T., Chaplin A.F. *Vozbuzhdeniye elektromagnitnykh voln* (Excitation of Electromagnetic Waves), Moscow, 1967, 376 p. (in Russ.)
13. Ufimtsev P.Ya. *Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction*, John Wiley & Sons, 2007, 329 p.
14. Janaswamy R. *IEEE Trans. on AP*, 1989, no. 12(37), pp. 1523-1528.
15. Janaswamy R., Shaubert D.H., Pozar D.M. *Radio Science*, 1986, no. 5(21), pp. 797-804.
16. Zayarny V.P. *Radiofizicheskiye svoystva tverdotel'nykh sloistykh struktur s zaryadovoy svyaz'yu. Metody i informatsionnyye vozmozhnosti dlya ikh opredeleniya* (Radiophysical Properties of Solid-State Charge-Coupled Layered Structures. Methods and Information Possibilities for Their Determination), Moscow, 2001, 212 p. (in Russ.)

Data on authors

Vyacheslav P. Zayarny	—	Dr. Sci., Professor; Volgograd State Technical University, Department of Physics; E-mail: zvp2000@mail.ru
Eugeny I. Nefyodov	—	Dr. Sci., Professor; V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Fryazino Branch, Laboratory of Microwave Properties of Ferromagnetics; E-mail: nefyodov32@mail.ru
Yury I. Sidiyakin	—	Dr. Sci., Professor; Volgograd State Technical University, Department of Technology of Mechanical Engineering
Igor N. Ponomarev	—	Volgograd State University, Department of Telecommunication Systems; Senior Lecturer, E-mail: ponomarev.igor@volsu.ru
Dmitry V. Zayarny	—	Undergraduate Student; Volgograd State Technical University, Department of Technology of Mechanical Engineering

The article was submitted 21.10.2021; approved after reviewing 06.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.

**ПРОБЛЕМАТИКА УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛА**

С. В. БАЙДЕНКО

*НИТИ „Авангард“, Санкт-Петербург, Россия
thesergio@yandex.ru*

Аннотация. Проанализированы проблемы и ограничения, связанные с улучшением параметров точности, разрешающей способности, показателей надежности, а также с уменьшением значений массогабаритных характеристик фотоэлектрических преобразователей угла в изделиях с высокой степенью надежности. Систематизируются степень влияния и причинно-следственные взаимоотношения факторов, препятствующих улучшению основных параметров датчиков угла поворота, а также дается заключение о возможных направлениях снижения их воздействия в целях улучшения характеристик преобразователей.

Ключевые слова: фотоэлектрический цифровой преобразователь угла, энкодер, датчик углового положения, преобразователь угол-код, точность, надежность, разрешающая способность

Ссылка для цитирования: Байденко С. В. Проблематика улучшения характеристик фотоэлектрических преобразователей угла // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 132—139. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-132-139.

**PROBLEM OF IMPROVING THE CHARACTERISTICS
OF PHOTOELECTRIC ANGLE CONVERTERS**

S. V. Baidenko

*SRTI Avangard JSC, St. Petersburg, Russia
thesergio@yandex.ru*

Abstract. The current problems and limitations associated with improving the accuracy parameters, resolution, reliability indicators, as well as reducing the mass and size characteristics of photoelectric digital angle converters in products with a high degree of reliability, are analyzed. The degree of influence and causal relationships of factors preventing the improvement of the main parameters of the rotation angle sensors are systematized, and a conclusion on possible directions of reducing their impact to improve the characteristics of the converters is given.

Keywords: photoelectric digital angle converter, encoder, angular position sensor, angle-code converter, accuracy, reliability, resolution

For citation: Baidenko S. V. Problem of improving the characteristics of photoelectric angle converters. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 2. P. 132—139 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-132-139.

Фотоэлектрические цифровые преобразователи угла (ФЦПУ) — это группа измерительных устройств из класса преобразователей угловых и линейных перемещений, принцип работы которых основан на трансформации модулированного угловым перемещением вала потока излучения в электрические сигналы, однозначно соответствующие определенному угловому положению [1].

Задача подсчета числа импульсов при угловом или линейном перемещении, на первый взгляд, достаточно тривиальна. Но более чем за 60-летнюю историю развития данного направления появилось множество уникальных вариантов конструкций и сложных технических решений [2—7]. Совершенствование характеристик ФЦПУ в образцах техники с повышенными требованиями к надежности определяется необходимостью непрерывного повышения точности и разрешающей способности, а также уменьшения размеров в целях улучшения так-

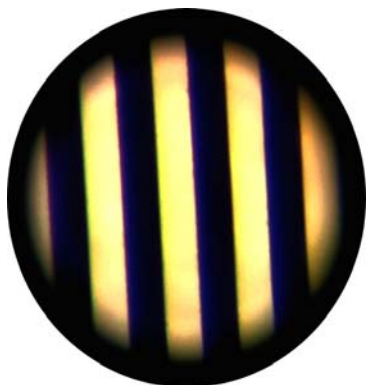
тико-технических характеристик основного изделия [8]. Каждая из этих задач имеет собственные трудности и ограничения по возможности дальнейшего совершенствования.

Повышение точности преобразователей сопряжено с улучшением нескольких взаимосвязанных характеристик. Рассмотрим трудности и ограничения улучшения параметров и характеристик фотоэлектрических преобразователей угла, связанные с оптико-механической частью изделия.

Так, повышение разрешающей способности преобразователя непосредственно связано с увеличением числа щелей (штрихов) на кодovém диске (КД), достичь которого возможно, уменьшив площадь щели. Но этот процесс имеет физические ограничения, связанные с предельным числом щелей, которые возможно нанести для конкретного диаметра. Высокоточные кодовые структуры фотоэлектрических преобразователей угла, выполненные на стеклянной подложке, имеют погрешность нанесения щелей порядка 0,4 мкм (3" для диаметра 50 мм). В то же время при использовании в качестве материала диска металлических пластин и применении метода химического травления или лазерной резки это значение возрастает до десятков микрометров.

На рис. 1, *а* приведена кодовая структура с периодом 12 мкм, выполненная в НИТИ „Авангард“ методом фотолитографии, а на рис. 1, *б* — часть кодовой шкалы, выполненная с применением лазерной резки на металлическом диске, с наименьшим периодом дорожки 350 мкм.

а)



б)



Рис. 1

Большое число нанесенных щелей (штрихов) снижает количество пропускаемого света, поскольку ширина щели уменьшается прямо пропорционально увеличению их числа. Это может повлечь за собой сложности, связанные с существенным ослаблением мощности сигнала вследствие aberrаций оптической системы [9], что с течением времени и при воздействии температуры приведет к снижению надежности.

На точность измерений ФЦПУ влияет как однородность изготовления рисунка кодирующих структур, так и эксцентриситет их градуировки [10]. Для достижения высокой точности измерений такие ошибки должны быть устранены, минимизированы или исправлены при последующей обработке сигналов.

Ввиду физических ограничений [9] последующее увеличение разрешающей способности будет связано с интерполяцией гармонических сигналов. Оптимизация методов интерполяции является приоритетным направлением в повышении разрешающей способности преобразователей угла. Хорошо известным и проверенным методом электронной интерполяции является использование схемы компарирования синусно-косинусных сигналов [11]. С помощью этого метода возможна стабильная 16-кратная интерполяция на существующей элементной компонентной базе (ЭКБ) для применения в изделиях с повышенными требованиями к надежности.

В свою очередь, методы интерполяции, основанные на применении алгоритма последовательного приближения для оценки тригонометрических и гиперболических функций

CORDIC (COordinate Rotation DIgital Computer) [12, 13] и его улучшенных модификаций демонстрируют высокий коэффициент интерполяции в сочетании с низкой погрешностью. Максимально достижимая точность ограничена числом бит в „механизме“ CORDIC [14]. Так, например, устройство CORDIC серии микроконтроллеров STM32G4 поддерживает 16- и 32-битные входные и выходные данные и имеет внутреннюю разрядность 24 бита. Максимальная остаточная погрешность вычислений после 24 итераций равна $1,9 \cdot 10^{-6}$ для 32-битных входных данных, что соответствует 19-битной точности.

Для обеспечения высокого качества измерений и надежности при эксплуатации ФЦПУ кодовый диск и вал преобразователей должны быть установлены в высокоточном подшипниковом узле. Механическая стабильность любого преобразователя определяется конструкцией подшипникового узла, а общая точность вращения складывается из точности при малом угловом смещении и точности в полном угловом диапазоне вращения. В первом случае основными источниками возникновения погрешности являются дефекты кодовой структуры, изменения в чувствительных компонентах схемы и несовершенство коррекции сигнала при обработке данных измерения. Во втором случае основные источники погрешности — эксцентриситет установки кодового диска (вала) и биение подшипников [10].

Эксцентриситет вала определяется точностью изготовления самой детали, тогда как эксцентриситет установки кодового диска может быть устранен благодаря оптической и/или электронной юстировке. К оптической юстировке можно прибегнуть при центрировании дисков преобразователей с низкой точностью либо при предварительной установке КД прецизионных устройств.

На рис. 2 показан пример установки, используемой при электронной юстировке кодового диска ФЦПУ (1). Вал преобразователя равномерно вращается и сигналы диаметрально противоположно установленных считывателей (2, 3) отображаются на экране осциллографа (4). На основании данных о разнице фаз со считывателей пьезоактуатор (5) в определенные моменты времени смещает кодовый диск, устраняя тем самым эксцентриситет его установки. При помощи этого метода можно уменьшить погрешность установки Δe до субмикронных значений. Эксцентриситет градуировки и радиальное биение подшипников являются причинами остаточной погрешности [15].

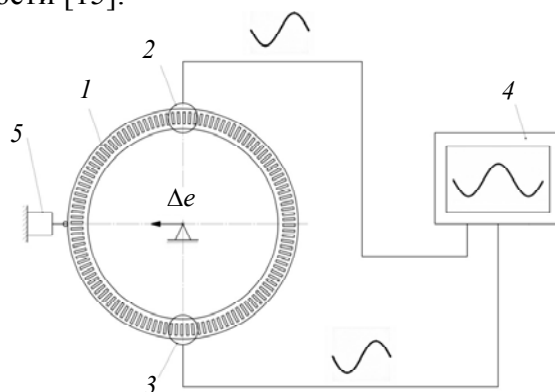


Рис. 2

Биение подшипников может существенно снизить точность вращения вала преобразователя, а следовательно и точность измерений, что делает выбор подходящего подшипника важной частью процесса разработки. Радиальное биение содержит как периодически повторяющуюся, так и неповторяющуюся составляющие, которые могут быть отнесены к недостаткам подшипниковых систем (люфт, несовершенство тел и дорожки качения, эксцентриситет).

В связи с этим карты ошибок, используемые для устранения циклической погрешности, должны быть построены на основании достаточного большого числа оборотов вала преобразователя [10].

Погрешность, вносимая радиальным биением подшипника, определяется по формуле:

$$\Delta\varphi = \pm 412,5 \frac{e}{D}, \quad (1)$$

где D — диаметр дорожки кодового диска (в миллиметрах), $\Delta\varphi$ — погрешность преобразователя (в угловых секундах), e — величина радиального биения подшипника (в микрометрах) [16].

Согласно формуле (1), для кодовой шкалы диаметром 46 мм при использовании подшипников с $e=3$ мкм погрешность, вносимая биением, составляет $\sim 27''$. Эту погрешность можно в значительной степени снизить благодаря установке диаметрально противоположных пар считывающих элементов [10]. В определенном случае эксцентриситет вала преобразователя, обусловленный несовершенством подшипников, и эксцентриситет рисунка кодовой шкалы могут компенсироваться.

На итоговое значение погрешности преобразователя, установленного в основное изделие, существенное влияние также оказывают соосность установки и параметры сопрягающей муфты, ее точность и конструкция. Между нагрузкой на подшипник и его сроком службы существует связь [17], выражаемая формулой $n = (C/P)^3$, где n — срок службы подшипника (обороты), C — динамическая грузоподъемность (Н), P — нагрузка на подшипник (Н). Из данной формулы видно, что при увеличении нагрузки на подшипник на m Н срок его службы уменьшается в m^3 раз.

При рассмотрении показателей надежности элементной компонентной базы в контексте ФЦПУ пристальное внимание должно быть уделено надежности оптоэлектронных компонентов, в особенности источникам и приемникам излучения. Эти компоненты наиболее чувствительны к воздействию внешних воздействующих факторов (ВВФ), а также высокоэнергетических частиц (ВЭЧ): протоны, электроны, ионы. Их резервирование сложно, а в некоторых случаях невозможно заложить на уровне преобразователя с сохранением прежних массогабаритных и точностных характеристик. Отказ любой пары излучатель—приемник является достаточным условием для нарушения монотонности и информационной емкости выходного кода датчика углового положения, приводящего к неработоспособности. Для минимизации отказов комплектующих оптоэлектронных изделий и увеличения времени наработки ФЦПУ в условиях воздействия ВВФ необходимо использовать определенные типы и материалы полупроводниковых структур; типы кодовых структур с исправлением одиночных ошибок [18]; учитывать влияние ВЭЧ на материалы пассивных оптических компонентов (покровные стекла, линзы и т.п.); располагать достоверными параметрами и характеристиками рабочей среды, при необходимости подвергать изделия непосредственному воздействию ВЭЧ при проведении испытаний, не полагаясь на оценочные/расчетные данные.

В качестве примера необходимости детальной проработки всех сформулированных моментов можно привести отказ оптопар, которые использовались в одной из частей схемы управления маневровыми двигателями космического корабля Торех/Poseidon после 2,5 лет эксплуатации [19]. Радиационные испытания этих оптопар не проводились: разработчики ограничились полученными из теоретической модели значениями общей дозы ионизирующего излучения, которые не учитывали плотность потока частиц (флюенс) Φ в рабочей среде. Также разработчиками не была учтена крайняя чувствительность оптопар к дефектам смещения от протонов в кристаллической решетке полупроводников. Тем не менее часть схемы, непосредственно связанной с двигателями, продолжала работать, так как в ее проектировании разработчики использовали ультраконсервативный подход при реализации своей части конструкции.

Так, одним из наиболее устойчивых к радиационному повреждению типов структуры для применения в источниках излучения, согласно [19], является двойной гетеропереход. Устройства, основанные на структуре этого типа, могут работать при уровнях излучения примерно на два порядка выше, чем у устройств с амфотерными примесями [19], дегради-

рующих при относительно низких уровнях излучения, что может вызвать серьезные проблемы в случае применения в условиях космоса. На рис. 3 показано сравнение деградации партий светодиодов различных типов и различных производителей, каждая из которых состоит из 30 устройств (F — световой поток, Φ — плотность потока протонов).

Радиационное повреждение в гораздо меньшей степени влияет на фотоотклик кремниевых $p-i-n$ -детекторов, чем обычных $p-n$ -фотодиодов (рис. 4, S — фоточувствительность), поэтому их применение в космической технике является одним из наиболее предпочтительных вариантов. Также в [20] отдельное внимание уделяется фотоприемникам на основе перспективных структур „металл—полупроводник—металл“.

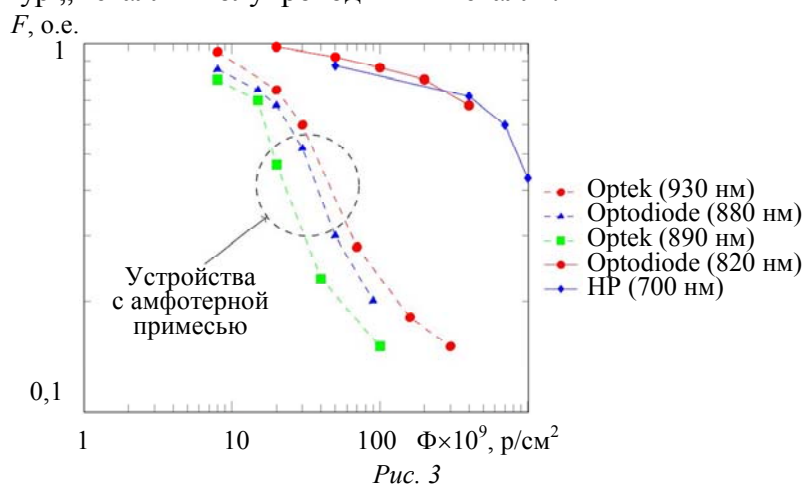


Рис. 3

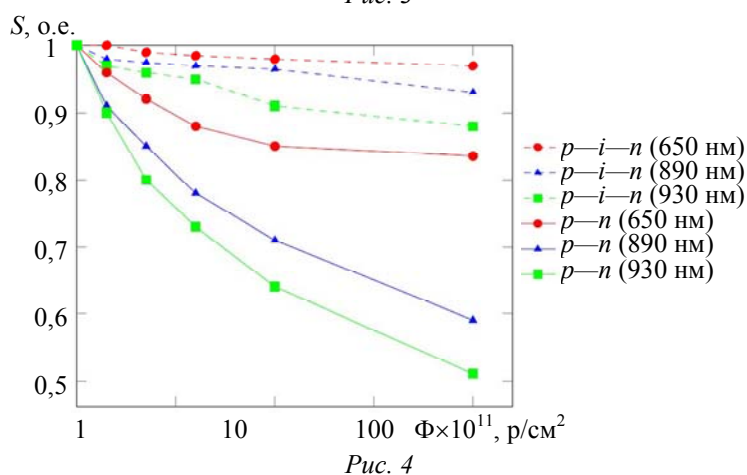


Рис. 4

При условии наличия всей необходимой информации для разработки ФЦПУ разработчик также может столкнуться с отсутствием определенных типов компонентов по функциональным, технологическим или конструктивным параметрам, поскольку вся номенклатура ЭКБ, разрешенная для применения при разработке, модернизации, производстве и эксплуатации изделий с высокими требованиями к надежности, подпадает под действие ограничительных перечней.

Так, например, ФЦПУ производства Codechamp (Франция) FPCOA09-01, упомянутый в Техническом доюме Европейского космического агентства [21], при схожих точностных характеристиках ($\pm 40''$ для 16 бит) и области применения с образцами отечественного производства имеет практически в два раза меньшие размеры ($\varnothing 22,5$, h22), в основном за счет применения более совершенных комплектующих, в том числе позволяющих использовать иные конструкторские решения [22]. А при сравнении преобразователей по критерию габаритных размеров, например, с FPCOA23-03 ($\varnothing 57$, h74) превосходит в четыре раза по точности ($\pm 7''$ для 18—19 бит).

Исходя из рассмотренных трудностей и ограничений, связанных с улучшением параметров и характеристик ФЦПУ, можно сделать следующие выводы:

Повышение разрешающей способности ФЦПУ без увеличения их массогабаритных характеристик в большей степени связано с разработкой новых и оптимизацией существующих алгоритмов интерполяции ввиду физических ограничений при изготовлении кодирующих структур.

Уменьшение погрешности преобразователей, вносимой механической частью, должно быть основано на использовании прецизионных деталей в составе оптико-механического блока, изготовленных из сертифицированных высококачественных материалов, и подшипников высокой точности (не ниже 2-го класса), дополнительно подвергнутых процедуре комплекования [23], а также использовании высокоточных измерительных систем на всех стадиях производства.

Также для увеличения точности и уменьшения погрешности следует использовать методы коррекции ошибок значений выходного кода, как единичных случайных, так и носящих периодический характер: в том числе, возможно рассмотреть создание адаптивных систем с самоопределением эксцентриситета [24] и самокалибровкой.

Для улучшения показателей надежности преобразователей (безотказности, долговечности, ремонтпригодности) необходимо обладать исчерпывающей информацией как при формировании технического задания, так и при разработке изделий, которая учитывает все нюансы параметров рабочих режимов, сред и т.п. Не следует всецело руководствоваться результатами расчетных способов получения данных при определении показателей надежности и принимать их достоверность эквивалентной результатам испытаний. Также представляется необходимым рассмотреть возможность применения программных алгоритмов для повышения показателей безотказности и ремонтпригодности.

Уменьшение массогабаритных характеристик ФЦПУ зависит от наличия современной отечественной ЭКБ и устранения отставания в развитии этого направления по определенным позициям, в том числе изделиям оптоэлектроники. Использование в разработке современной ЭКБ также предоставит возможности для применения новых конструктивных решений и развитию других типов преобразователей угловых и линейных перемещений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домрачев В. Г., Мейко Б. С. Цифровые преобразователи угла: принципы построения, теория точности, методы контроля. М.: Энергоатомиздат, 1984. 328 с.
2. Пат. СССР 1619398. Преобразователь угол-код / И. В. Меськин, Л. Н. Мальцев, Ю. А. Сторожук, А. А. Ожиганов. Заявл. 24.11.1987, опубл. 07.01.1991.
3. Пат. РФ 79360U1. Преобразователь угол-код / А. А. Ожиганов. Заявл. 28.07.2008, опубл. 27.12.2008.
4. Пат. РФ 2553079C1. Инверсно-сопряженная кодовая шкала / К. М. Ростовский, П. А. Прибыткин, А. А. Ожиганов. Заявл. 15.11.2013, опубл. 10.06.2015.
5. Pat. US20190170539. Inductive position detector / M. A. Howard, D. Kreit. Publ. 2019-06-06.
6. Pat. US10823550. Optical position measuring device / K. Sändig, W. Huber. Publ. 2020-11-03.
7. Pat. WO2021116660. Rotary encoder / F. J. Evans, J. R. Henshaw. Publ 2021-06-17.
8. Асиновский Э. Н. и др. Высокоточные преобразователи угловых перемещений / Под ред. А. А. Ахметжанова. М.: Энергоатомиздат, 1986. 128 с.
9. Riedl M. Optical Design Fundamentals for Infrared Systems. Bellingham, WA: SPIE Press, 2001. 202 p.
10. Renishaw Plc. The accuracy of rotary encoders. 2019 [Электронный ресурс]: <<https://resources.renishaw.com/en/details/white-paper-the-accuracy-of-angle-encoders--113122>>. (дата обращения: 18.08.2021)
11. Востоков С. Б. Интерполяционные цифровые преобразователи угла. Л.: ЦНИИ „Румб“, 1987. 62 с.

12. Volder J. E. The CORDIC trigonometric computing technique // IRE Trans. Electron. Comput. 1959. EC-8, is 3. P. 330—334.
13. Калачев А. В. Быстрая тригонометрия: математический ускоритель CORDIC в микроконтроллерах STM32G4 [Электронный ресурс]: <<https://www.compel.ru/lib/140072>>. (дата обращения: 21.08.2021)
14. STMicroelectronics. Getting started with the CORDIC accelerator using STM32CubeG4 MCU Package [Электронный ресурс]: <<https://www.st.com>>. (дата обращения: 11.08.2021)
15. Smirnov N. V., Latyev S. M., Theska R. Adjustment and evaluation of incremental optical rotary encoders // Shaping the Future by Engineering. 2014. Vol. 58, N 4. P. 4.
16. Celera motion. How does scale eccentricity or bearing runout affect angular error? [Электронный ресурс]: <<https://www.celeramotion.com/microe/support/faqs/how-does-scale-eccentricity-or-bearing-runout-affect-angular-error/>>. (дата обращения: 26.08.2021)
17. NSK Europe Ltd. Bearing life – Calculating the basic fatigue life expectancy of rolling bearings [Электронный ресурс]: <https://www.nskeurope.com/content/dam/nskcmsr/downloads/literature_bearing/P_TI-0102_EN.pdf>. (дата обращения: 22.08.2021)
18. Ожиганов А. А., Прибыткин П. А. Исправление одиночных ошибок в цифровых преобразователях угла на основе рекурсивных шкал // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 7. С. 620—625.
19. Johnston A. Optoelectronic devices with complex failure modes [Электронный ресурс]: <<https://trs.jpl.nasa.gov/handle/2014/15609>>.
20. Marshall C., Marshall P. Proton Effects and Test Issues for Satellite Designers: Displacement Effects [Электронный ресурс]: <<https://ntrs.nasa.gov/citations/19990099117>>. (дата обращения: 19.08.2021)
21. European Space Agency. Position sensor: European space technology harmonization technical dossier, 2009 [Электронный ресурс]: <<https://www.sme4space.org/wp-content/uploads/harmonisationbrochure2016finale1.pdf>>.
22. Pat. US20090084945. Photodiode array for an optical encoder, photodiode detection system, and optical encoder / R. E. Franklin. Publ. 2010-03-16.
23. Королев А. А., Королев А. В., Тюрин А. В., Мухина Е. В. Комплектование шариковых подшипников по критериям минимальной нагрузки на тела качения и требуемой величины зазора. М.: ИНФРА-М, 2021. 248 с.
24. Li X., Ye G., Liu H., Ban Y., Shi Y., Yin L., Lu B. A novel optical rotary encoder with eccentricity self-detection ability // Review of Scientific Instruments. 2017. Vol. 88, N 11. P. 115005.

Сведения об авторе

Сергей Викторович Байденко — АО НИТИ „Авангард“, ведущий инженер; E-mail: thesergio@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.10.2021; одобрена после рецензирования 29.10.2021; принята к публикации 30.12.2021.

REFERENCES

1. Domrachev V.G., Meiko B.S. *Tsifrovyye preobrazovatel' ugla: printsipy postroyeniya, teoriya tochnosti, metody kontrolya* (Digital Angle Transducers: Principles of Construction, Theory of Accuracy, Control Methods), Moscow, 1984, 328 p. (in Russ.)
2. Patent USSR 1619398, *Preobrazovatel' ugol-kod* (Angle-Code Converter), I.V. Meskin, L.N. Maltsev, Yu.A. Storozhuk, A.A. Ozhiganov, Priority 24.11.1987, Published 07.01.1991. (in Russ.)
3. Patent RU 79360U1, *Preobrazovatel' ugol-kod* (Angle-Code Converter), A.A. Ozhiganov, Priority 28.07.2008, Published 27.12.2008. (in Russ.)
4. Patent RU 2553079C1, *Inversno-sopryazhennaya kodovaya shkala* (Inverse Conjugate Code Scale), K.M. Rostovskiy, P.A. Pribytkin, A.A. Ozhiganov, Priority 15.11.2013, Published 10.06.2015. (in Russ.)
5. Patent US2019017053, *Inductive position detector*, M.A. Howard, D. Kreit, Published 2019-06-06.
6. Patent US10823550, *Optical position measuring device*, K. Sändig, W. Huber, Published 2020-11-03.
7. Patent WO2021116660, *Rotary encoder*, F.J. Evans, J.R. Henshaw, Published 2021-06-17.
8. Asinovsky E.N. et al. *Vysokotochnyye preobrazovatel' uglovykh peremeshcheniy* (High-Precision Angular Displacement Transducers), Moscow, 1986, 128 p. (in Russ.)
9. Riedl M. *Optical Design Fundamentals for Infrared Systems, Second Edition*, Bellingham, WA, SPIE Press, 2001, 202 p.
10. Renishaw Plc. *The accuracy of rotary encoders*, 2019, <https://resources.renishaw.com/en/details/white-paper-the-accuracy-of-angle-encoders-113122>.
11. Vostokov S.B. *Interpolyatsionnyye tsifrovyye preobrazovatel' ugla* (Interpolating Angle Digitizers), Leningrad, 1987, 62 p. (in Russ.)
12. Volder J.E. *IRE Trans. Electron. Comput.*, 1959, no. 3(EC-8), pp. 330—334.

13. <https://www.compel.ru/lib/140072>. (in Russ.)
14. STMicroelectronics. *Getting started with the CORDIC accelerator using STM32CubeG4 MCU Package*, <https://www.st.com>.
15. Smirnov N.V., Latyev S.M., Theska R. *Shaping the Future by Engineering*, 2014, no. 4(58), pp. 4.
16. Celeramotion. *How does scale eccentricity or bearing runout affect angular error?* <https://www.celeramotion.com/microe/support/faqs/how-does-scale-eccentricity-or-bearing-runout-affect-angular-error>.
17. NSK Europe Ltd. *Bearing life – Calculating the basic fatigue life expectancy of rolling bearings*, https://www.nsk europe.com/content/dam/nskcmsr/downloads/literature_bearing/P_TI-0102_EN.pdf.
18. Ozhiganov A.A., Pribytkin P.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 7(63), pp. 620–625. (in Russ.)
19. Johnston A. *Optoelectronic devices with complex failure modes*, <https://trs.jpl.nasa.gov/handle/2014/15609>.
20. Marshall C., Marshall P. *Proton Effects and Test Issues for Satellite Designers: Displacement Effects*, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19990099117>.
21. European Space Agency. *Position sensor: European space technology harmonization technical dossier*, 2009, <https://www.sme4space.org/wp-content/uploads/harmonisationbrochure2016finale1.pdf>.
22. Patent US20090084945, *Photodiode array for an optical encoder, photodiode detection system, and optical encoder*, R.E. Franklin, Published 2010-03-16.
23. Korolev A.A., Korolev A.V., Tyurin A.V., Mukhina E.V. *Komplektovaniye sharikovykh podshipnikov po kriteriyam minimal'noy nagruzki na tela kacheniya i trebuyemoy velichiny zazora* (Completion of Ball Bearings According to the Criteria of the Minimum Load on the Rolling Elements and The Required Clearance), Moscow, 2021, 248 p. (in Russ.)
24. Li X., Ye G., Liu H., Ban Y., Shi Y., Yin L., Lu B. *Review of Scientific Instruments*, 2017, no. (88), pp. (11), p. 115005.

Data on author

Sergey V. Baidenko — SRTI Avangard JSC; Leading Engineer; E-mail: thesergio@yandex.ru

The article was submitted 11.10.2021; approved after reviewing 29.10.2021; accepted for publication 30.12.2021.

АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМ АНАЭРОБНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. А. ФОМЕНКОВА

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Росси
a.a.fomenkova@mail.ru*

Аннотация. Предлагается учитывающая взаимное влияние физических и биохимических процессов структурная модель взаимосвязей процессов биологической очистки сточных вод. Модель позволяет анализировать работоспособность систем анаэробной биологической очистки при эксплуатации. Обосновывается необходимость непрерывного контроля технического состояния этих систем, ориентированного, в первую очередь, на выявление причин деградации микроорганизмов. На основе общего подхода к диагностике сложных технических систем предложены алгоритмы непрерывного контроля технического состояния системы анаэробной биологической очистки сточных вод, позволяющие выявить причины неисправностей различной природы и сократить число проводимых лабораторных исследований.

Ключевые слова: анаэробная очистка сточных вод, техническое состояние, наблюдаемые параметры, деградация биомассы, алгоритмы анализа технического состояния, диагностика сложных систем, модель анаэробного брожения

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-08-00747.

Ссылка для цитирования: Фоменкова А. А. Анализ работоспособности систем анаэробной биологической очистки сточных вод в процессе эксплуатации // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 140—147. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-140-147.

ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF ANAEROBIC BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS DURING OPERATION

A. A. Fomenkova

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russia
a.a.fomenkova@mail.ru*

Abstract. A structural model of processes interrelation in biological wastewater treatment is proposed. The model accounts for the mutual influence of physical and biochemical processes and provides an analysis of the performance of anaerobic biological treatment systems during operation. It has been proven that continuous monitoring of the technical condition of these systems is necessary, focused primarily on identifying the causes of degradation of microorganisms. Based on a general approach to diagnostics of complex technical systems, algorithms for continuous monitoring of the technical condition of an anaerobic biological wastewater treatment system are proposed, which make it possible to identify the causes of malfunctions of various nature and reduce the number of laboratory tests carried out.

Keywords: anaerobic wastewater treatment, technical state, observed parameters, biomass degradation, algorithms of technical state analysis, complex systems diagnostics, anaerobic digestion model

Acknowledgments: the work was supported by RFBR grant No. 20-08-00747.

For citation: Fomenkova A. A. Analysis of the performance of anaerobic biological wastewater treatment systems during operation. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 2. P. 140—147 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-140-147.

Введение. Одной из важных тенденций развития инфраструктуры промышленных предприятий, направленных на повышение их экологической безопасности, является использование локальных систем очистки сточных вод. В частности, для производств пищевой промышленности характерно использование многоэтапной очистки сточных вод с использованием механических, физико-химических и биологических методов очистки. Высокое содержание органических веществ в сточной воде обуславливает применение анаэробных методов биологической очистки, основанных на особенностях жизнедеятельности микроорганизмов. Это, в свою очередь, делает актуальной задачу непрерывного контроля технического состояния (ТС) локальных очистных сооружений. Сложность оценки ТС систем очистки и необходимость оценивания жизнеспособности микроорганизмов на этапе биологической очистки требуют построения структурной модели взаимосвязей процессов различной природы при анаэробном брожении.

Целью настоящей статьи является разработка алгоритмов непрерывного оценивания технического состояния систем анаэробной биологической очистки (САБО), основанных на моделировании взаимосвязей процессов биологической очистки сточных вод и жизнедеятельности анаэробного биоценоза с технологическими особенностями организации процесса очистки и конструктивной спецификой оборудования, с использованием методологии диагностики сложных систем [1—3].

Постановка задачи оценки технического состояния системы анаэробной биологической очистки. В последнее время все большее внимание уделяется локальным очистным сооружениям предприятий пищевой промышленности. Функционирование этих сооружений требует непрерывного контроля их технического состояния, что связано как с соблюдением необходимых параметров технологического процесса, так и с обеспечением экологической безопасности производства, требования к которым постоянно ужесточаются. В этой связи непрерывный анализ технического состояния системы очистки сточных вод предприятия имеет важное практическое значение как в процессе эксплуатации, так и при принятии решений по предотвращению аварийных ситуаций. Для предприятий пищевой промышленности важным и наименее исследованным элементом системы очистки сточных вод являются анаэробные биореакторы, функционирование которых во многом зависит от состояния биомассы, выполняющей разложение органических отходов. Анализ работоспособности такой системы требует выделения параметров ее функционирования. В общем случае локальная анаэробная система очистки характеризуется:

1) входными параметрами системы U , включающими концентрацию загрязнений в сточной воде S_{in} , объем сточных вод, поступающих на очистку в единицу времени Q_{in} , температуру θ_{in} ;

2) выходными параметрами системы Y , характеризующими свойства очищенной воды Y_{CB} и образованного в процессе разложения органического вещества биогаза Y_G ;

3) параметрами внутреннего состояния системы X , определяющими процесс анаэробного брожения и включающими параметры как биомассы B_x , так и сточной воды: концентрации загрязнений S_x , промежуточных P_x и конечных G_x продуктов биохимического преобразования органических веществ, гидродинамическую обстановку в биореакторе, определяемую полем скоростей газожидкостной среды W , температурный режим в биореакторе θ .

Основным элементом функционирования анаэробной системы очистки, в наибольшей степени определяющим ее работоспособность, является биомасса, состояние которой, однако, не может быть непосредственно оценено инструментальными методами. Поэтому основная задача настоящей работы заключается в разработке алгоритмов непрерывного контроля работоспособности системы анаэробной очистки, которые на основе доступных к измерению параметров позволят оценить техническое состояние с учетом состояния биомассы, обеспечат своевременное принятие решений в процессе эксплуатации. Решение этой задачи связано с

необходимостью анализа модели взаимосвязей процессов биологической очистки сточных вод и жизнедеятельности анаэробной биомассы при заданных параметрах входного потока, состояния окружающей среды и ограничениях на допустимые режимы работы биореактора.

Структурная модель взаимосвязей процессов биологической очистки сточных вод и жизнедеятельности анаэробного биоценоза. Очистка сточных вод в САБО происходит в результате поэтапного преобразования органических веществ микробной популяцией в условиях, задаваемых технологическими режимами эксплуатации очистных сооружений. Особенностью систем анаэробной биологической очистки является то, что множество биохимических и физических процессов, определяющих закономерности разложения органических загрязнений сточной воды, происходят параллельно. Общая взаимосвязь этих процессов, описанная через параметры состояния системы, показана на рис. 1.

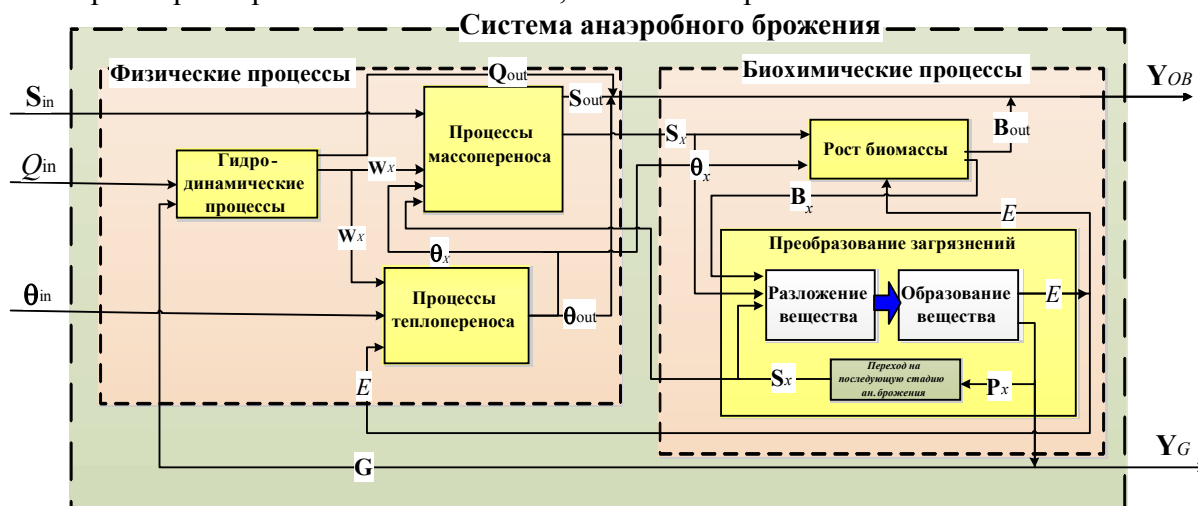


Рис. 1

На рис. 1 выделены различные уровни декомпозиции процессов в анаэробном биореакторе. Физические процессы, включающие массоперенос, теплоперенос и гидродинамические процессы, оказывают непосредственное влияние на рост, развитие биомассы и преобразование ею органических загрязнений. Физические и биохимические процессы в анаэробном биореакторе тесно взаимосвязаны и должны рассматриваться как единое целое. В модели (см. рис. 1) параметры системы даны в обобщенном виде.

Система анаэробной биологической очистки представляет собой многомерный, многосвязный, нестационарный объект, рассчитанный на длительный срок эксплуатации; этот объект чувствителен к изменению внешних воздействий, влияющих на условия жизнедеятельности микрофлоры. В процессе эксплуатации САБО важно своевременно принимать решения по техническому обслуживанию системы, на основе непрерывного контроля ее технического состояния. Общий подход к оцениванию ТС САБО разработан недостаточно [4—6], это негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках систем очистки и снижает их экологическую безопасность.

Особенности анализа технического состояния системы анаэробной биологической очистки сточных вод. Для оценивания ТС САБО предлагается использовать общий подход [1—3] диагностики сложных систем, выделяющий, как правило, три основных ТС системы — работоспособное, неработоспособное, частично работоспособное. Применительно к процессам анаэробной биологической очистки эти состояния должны быть дополнены оценкой состояния биомассы в биореакторе B_x . В процессе жизнедеятельности биомассы могут изменяться состав и численность популяции микроорганизмов, формы существования клеточных агрегатов, происходит развитие биомассы или ее деградация, связанная со снижением активности микроорганизмов, уменьшением удельной скорости их роста и развития популяции. Именно связанные с деградацией биомассы процессы, которые могут происходить в полно-

стью работоспособном состоянии биореактора, являются основным фактором выхода САБО из строя, практически не поддаются учету на этапе проектирования системы и непосредственному анализу в процессе эксплуатации. Исходя из специфики работы САБО предлагается следующая модель оценивания ее технического состояния (рис. 2, S_{out} — остаточная концентрация загрязнений в очищенной воде, S_{norm} — заданная максимальная концентрация загрязнений в очищенной воде, I_G — производительность системы по биогазу, I_{cp} — средний расчетный выход биогаза для данного типа сырья, $Q_{расч}$ — расход жидкости, предусмотренный технологическим процессом, CH_4 — содержание метана в биогазе).

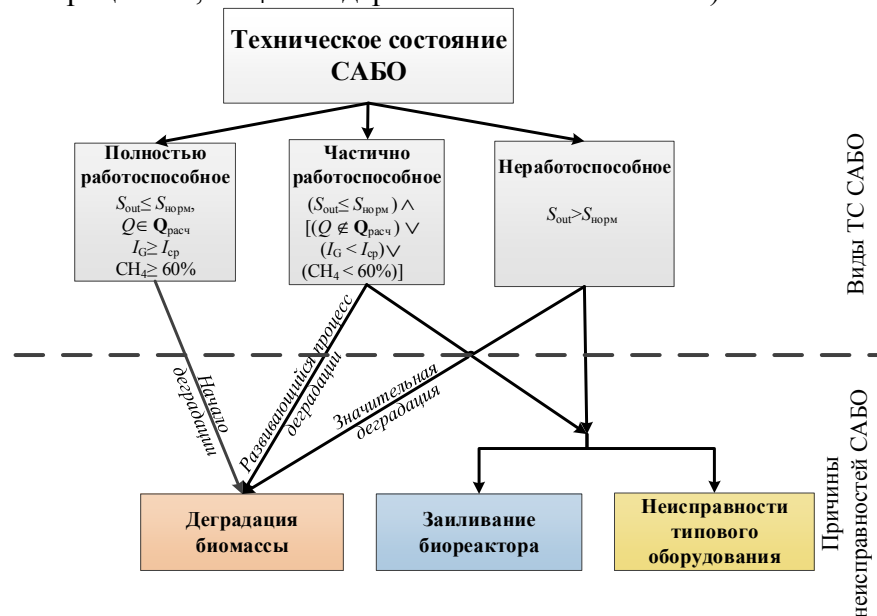


Рис. 2

Своевременное выявление начальных этапов деградации биомассы дает возможность принятия соответствующих решений и, таким образом, существенно влияет на эффективность использования системы. К основным факторам, вызывающим деградацию биомассы при анаэробном брожении, относят [4—10]: воздействие высоких концентраций субстрата на биомассу; недостаточное питание биомассы; разрушение клеточных агрегатов; нарушение температурного режима технологического процесса очистки; воздействие токсических веществ на биомассу; повышенную нагрузку по сточной воде на биореактор; недостаточное время обработки стока.

Указанные причины деградации биомассы положены в основу классификации ТС САБО, в результате получено множество технических состояний $St = \{St_i | i = \overline{1,16}\}$. Из выделенного множества St состояние St_1 соответствует полностью работоспособному техническому состоянию без признаков деградации биомассы, $St_2—St_6$ — работоспособному состоянию с признаками начала деградации биомассы, $St_7—St_{11}$ — частично работоспособному и $St_{12}—St_{16}$ — неработоспособному состоянию, потеря работоспособности в которых вызвана различными причинами угнетения микроорганизмов. Дальнейший синтез алгоритма анализа ТС САБО, учитывающего причины деградации микробной популяции, требует выделения параметров, несущих информацию о состоянии системы в целом и биомассы, в частности.

Наблюдаемые параметры при мониторинге ТС САБО с учетом состояния биомассы. В общем случае состояние микроорганизмов определяется вполне конкретными параметрами: концентрацией биомассы в биореакторе B , удельной скоростью роста μ и отмирания k_d популяции, скоростью потребления субстрата Y_S и производства продуктов метаболизма Y_P , удельной активностью метаногенов SMA . Эти параметры, формирующие вектор состояния биомассы B_x , невозможно измерить напрямую в процессе эксплуатации САБО. Однако как

развитие биомассы, так и ее деградация, проявляются в изменении показателей протекания технологического процесса очистки, доступных к измерению и косвенно указывающих на уровень активности и жизнеспособности микроорганизмов.

На основе структурной модели (см. рис. 1) сформировано множество диагностических признаков САБО $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1,19}\}$, разработано формальное описание процесса анаэробной очистки в виде обобщенной математической модели [11], при численном решении которой составлена модель анаэробного биореактора как объекта анализа ТС. Полученная модель позволила выбрать минимальный набор диагностических признаков, удовлетворяющих критериям минимальной стоимости и максимальной информативности проведения проверок, позволяющий на основе измеренных значений принять решение о текущем состоянии биомассы $\mathbf{B}_x$ в биореакторе и включающий следующие параметры: концентрация загрязнений в очищенной воде S_{out} , производительность системы по биогазу I_G и содержание метана в выработанном биогазе CH_4 , рабочая температура процесса θ , концентрация летучих жирных кислот VFA, кислотность среды в биореакторе pH, концентрация взвешенных веществ в очищенной воде TSS, производительность системы по сточной воде Q_{in} .

Своевременное принятие решений по управлению технологическим процессом очистки требует анализа ТС в реальном масштабе времени. Однако ввиду особенностей биохимических процессов неизбежным является лабораторный анализ проб, занимающий зачастую продолжительное время и требующий специального оборудования и квалифицированного персонала. В частности, отсутствуют инструментальные методы измерения концентрации летучих жирных кислот [10]. При разработке алгоритмов анализа ТС САБО предлагается использовать алгоритм проведения проверок диагностических признаков, ориентированный на уменьшение лабораторных исследований проб. Алгоритм разработан применительно к САБО согласно методологии [1, 2].

Алгоритм анализа работоспособности анаэробной системы очистки сточных вод. В основу алгоритма анализа ТС САБО с учетом состояния биомассы положено вычисление времени гидравлического пребывания стока на очистке HRT — один из основных показателей эффективности очистки, который нельзя непосредственно измерить, однако можно оценить по наблюдаемым параметрам. При этом расчет может быть проведен несколькими методами, а результат для полностью работоспособной системы без признаков деградации биомассы должен совпадать.

На основе имитационной модели анаэробного биореактора [12] оценивается расчетное время гидравлического пребывания HRT_p с учетом длительности эксплуатации системы после ее запуска.

Время пребывания стока на очистке HRT_{Γ} вычисляется исходя из измерений потерь давления в биореакторе, обеспечиваемого насосным оборудованием, осуществляющим подачу сточной воды в биореактор. Для расчета HRT_{Γ} необходимыми являются измерения расхода сточной воды Q_{in} и давления P_n , нагнетаемого насосным оборудованием.

Текущие измерения начальной концентрации загрязнений в стоке S_{in} , конечной концентрации загрязнений в очищенной воде S_{out} , рабочей температуры θ и кислотности pH в рабочей зоне биореактора дают возможность на основе численного решения математической модели [11] определить время очистки HRT_M .

Приведенные факторы позволяют сформулировать следующий алгоритм анализа работоспособности анаэробной системы очистки сточных вод с выявлением подсистемы, где предполагается отказ, основанной на использовании HRT как основного показателя эффективности анаэробного брожения (рис. 3). Для реализации вычислений должны быть измерены параметры θ , S_{in} , S_{out} , pH, Q_{in} , P_n .

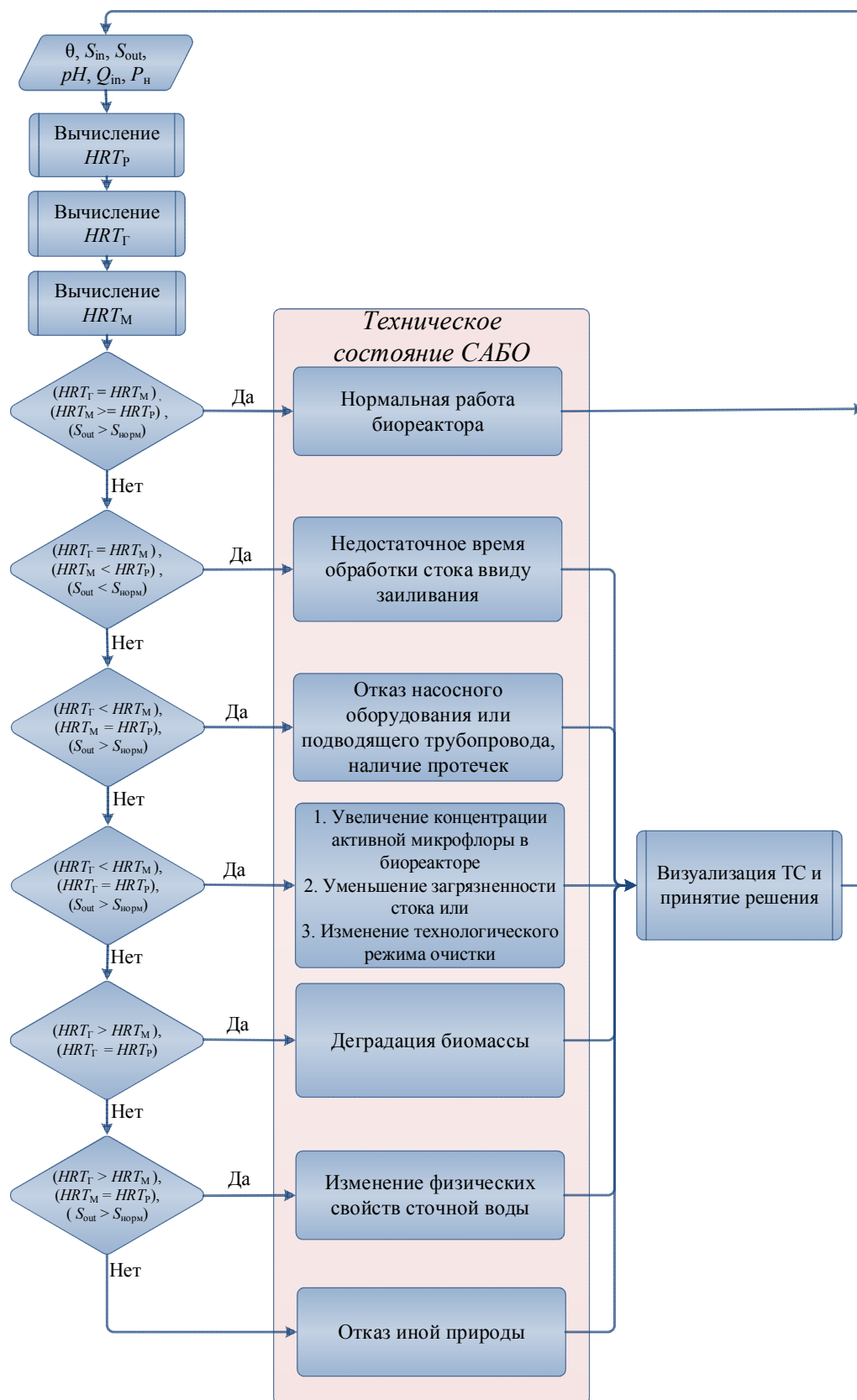


Рис. 3

Предложенный алгоритм отличается от известных тем, что позволяет выявить как неисправности оборудования биореактора, так и процессы жизнедеятельности биомассы, связанные с возможной ее деградацией при эксплуатации анаэробной системы очистки сточных вод

При нарушении условий жизнедеятельности биомассы, вызывающем ее деградацию, необходим лабораторный анализ проб. Для выявления причин угнетения микроорганизмов предлагается использовать гибкий алгоритм проведения проверок диагностических признаков (рис. 4), позволяющий сократить количество проводимых лабораторных исследований.

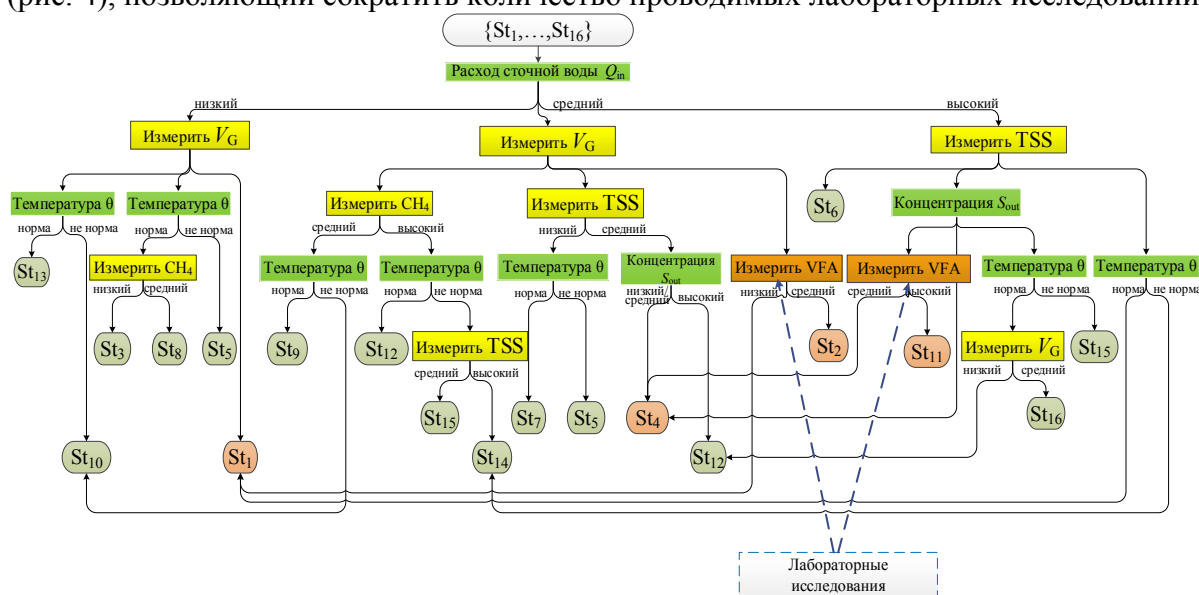


Рис. 4

Как следует из рис. 4, предложенный алгоритм позволяет существенно сократить число проводимых лабораторных исследований.

Выводы. Эксплуатация современных систем анаэробной биологической очистки сточных вод требует непрерывного контроля технического состояния, обеспечивающего безопасность и эффективность очистки. Предложенные в работе алгоритмы анализа технического состояния позволяют выявить неисправности различной природы, в том числе вызывающие деградацию биомассы в биореакторе, и могут быть использованы в автоматизированных системах управления технологическим процессом очистки, при проектировании и выборе технических средств реализации системы мониторинга и поддержки принятия решений при эксплуатации анаэробных систем очистки производственных сточных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев А. К., Юсупов Р. М. Идентификация и техническая диагностика. М.: МО СССР, 1987. 521 с.
2. Копкин Е. В., Кравцов А. Н., Мышко В. В. Анализ технического состояния космических средств. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. 190 с.
3. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 408 с.
4. Kazemi P., Bengoa C., Steyer J.-P., Giralt J. Data-driven techniques for fault detection in anaerobic digestion process // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 146. P. 905—915. DOI: 10.1016/j.psep.2020.12.016.
5. Sánchez-Fernández A., Baldán F. J. J., Sainz-Palmero G. I. I., Benítez J. M. M., Fuente M. J. J. Fault detection based on time series modeling and multivariate statistical process control // Chemometr. Intell. Lab. Syst. 2018. Vol. 182. P. 57—69. DOI:10.1016/j.chemolab.2018.08.003.
6. Lardon L., Punal A., Steyer J.-P. On-line diagnosis and uncertainty management using evidence theory—experimental illustration to anaerobic digestion processes // Journal of Process Control. 2004. Vol. 14. P. 747—763. DOI: 10.1016/j.procont.2003.12.007.
7. Boe K., Batstone D. J., Steyer J.-P., Angelidaki I. State indicators for monitoring the anaerobic digestion process // Water Res. 2010. Vol. 44. P. 5973—5980. DOI:10.1016/j.watres.2010.07.043.

8. Alcaraz-Gonzalez V., Lopez-Banuelos R. H., Steyer J.-P., Mendez-Acosta H. O., Gonzalez-Alvarez V., Pelayo-Ortiz C. Interval-based diagnosis of biological systems — a powerful tool for highly uncertain anaerobic digestion processes // *CLEAN — Soil, Air, Water*. 2012. Vol. 40. P. 941—949. DOI: 10.1002/clen.201100721.
9. Xiao H., Huang D., Pan Y., Liu Y., Song K. Fault diagnosis and prognosis of wastewater processes with incomplete data by the auto-associative neural networks and ARMA model // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2017. Vol. 161. P. 96—107. DOI:10.1016/j.chemolab.2016.12.009.
10. Hill A., Tait S., Baillie C., Virdis B., McCabe B. Microbial electrochemical sensors for volatile fatty acid measurement in high strength wastewaters: A review // *Biosensors and Bioelectronics*. 2020. Vol. 165. P. 112409—112420. DOI: 10.1016/j.bios.2020.112409.
11. Ключарёв А. А., Фоменкова А. А. Проектирование секционного анаэробного биореактора // Изв. Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2018. № 34(60). С. 95—100
12. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021613417. Программный модуль для имитационного моделирования системы анаэробной очистки сточных вод / А. А. Фоменкова, А. А. Ключарёв. № 2021612722, заявл. 09.03.2021.

Сведения об авторе

Анастасия Алексеевна Фоменкова — Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Институт вычислительных систем и программирования, кафедра компьютерных технологий и программной инженерии; старший преподаватель; E-mail: a.a.fomenkova@mail.ru

Поступила в редакцию 03.11.2021; одобрена после рецензирования 24.11.2021; принята к публикации 30.12.2021.

REFERENCES

1. Dmitriev A.K., Yusupov R.M. *Identifikatsiya i tekhnicheskaya diagnostika* (Identification and Technical Diagnostics), Moscow, 1987, 521 p. (in Russ.)
2. Kopkin E.V., Kravtsov A.N., Myshko V.V. *Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya kosmicheskikh sredstv* (Analysis of the Technical Condition of Space Vehicles), St. Petersburg, 2016, 190 p. (in Russ.)
3. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob"yektov* (Intelligent Technologies for Monitoring and Controlling the Structural Dynamics of Complex Technical Objects), Moscow, 2006, 408 p. (in Russ.)
4. Kazemi P., Bengoa C., Steyer J.-P., Giral J. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, vol. 146, pp. 905—915, DOI:10.1016/j.psep.2020.12.016.
5. Sánchez-Fernández A., Baldán F.J.J., Sainz-Palmero G.I.I., Benítez J.M.M., Fuente M.J.J. *Chemometr. Intell. Lab. Syst.*, 2018, vol. 182, pp. 57—69, DOI:10.1016/j.chemolab.2018.08.003.
6. Lardon L., Punal A., Steyer J.-P. *Journal of Process Control*, 2004, vol. 14, pp. 747—763, DOI: 10.1016/j.jprocont.2003.12.007.
7. Boe K., Batstone D.J., Steyer J.-P., Angelidaki I. *Water Res.*, 2010, vol. 44, pp. 5973—5980, DOI:10.1016/j.watres.2010.07.043.
8. Alcaraz-Gonzalez V., Lopez-Banuelos R.H., Steyer J.-P., Mendez-Acosta H.O., Gonzalez-Alvarez V., Pelayo-Ortiz C. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 2012, vol. 40, pp. 941—949, DOI: 10.1002/clen.201100721.
9. Xiao H., Huang D., Pan Y., Liu Y., Song K. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2017, vol. 161, pp. 96—107, DOI:10.1016/j.chemolab.2016.12.009.
10. Hill A., Tait S., Baillie C., Virdis B., McCabe B. *Biosensors and Bioelectronics*, 2020, vol. 165, pp. 112409—112420, DOI: 10.1016/j.bios.2020.112409.
11. Klyucharev A.A., Fomenkova A.A. *Proceedings of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 2018, no. 34(60), pp. 95—100. (in Russ.)
12. Certificate on the state registration of the computer programs №2021613417. *Programmnyy modul' dlya imitatsionnogo modelirovaniya sistemy anaerobnoy ochistki stochnykh vod* (Software module for simulation of an anaerobic wastewater treatment system), A.A. Fomenkova, A.A. Klyucharev. Priority 09.03.2021. (in Russ.)

Data on author

Anastasia A. Fomenkova — St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Institute of Computational Systems and Programming, Department of Computer Technologies and Software Engineering; Senior Lecturer; E-mail: a.a.fomenkova@mail.ru

The article was submitted 03.11.2021; approved after reviewing 24.11.2021; accepted for publication 30.12.2021.