

ISSN 2500—0381

Электронная версия

ISSN 0021—3454

Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е

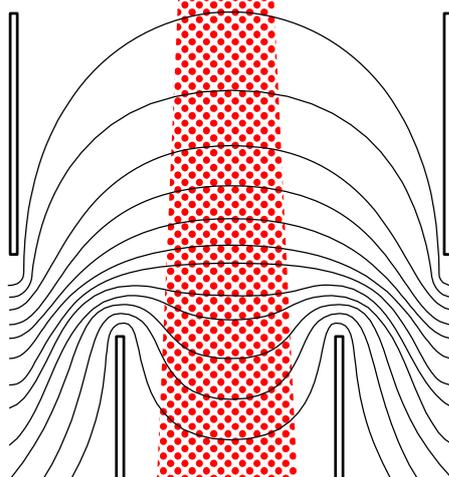
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ **10**

Т. 65
2022

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



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*д-р техн. наук, проф. А. А. БОБЦОВ,
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. П. АЛЕШКИН, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
А. В. БЕЛИКОВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. А. БЕССМЕРТНЫЙ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. А. БОГАТЫРЕВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Д. В. ЕФАНОВ, д-р техн. наук, проф., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
А. КЛИМЧИК, PhD, доцент, Университет Иннополис, Иннополис, Россия
С. А. КОЛЮБИН, д-р техн. наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. А. КОНЯХИН, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. В. КРИШТОП, д-р физ.-мат. наук, проф., ПНИПУ, Пермь, Россия
Л. С. ЛИСИЦЫНА, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. Д. ЛУКЪЯНОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., ОАО „Авангард“, Санкт-Петербург, Россия
А. В. ЛЯМИН, д-р техн. наук, доцент, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
А. В. МАЛОЛЕТОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет Иннополис, Иннополис, Россия
Ю. Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук, ООО „ЦРТ-инновации“, Санкт-Петербург, Россия
В. М. МЕДУНЕЦКИЙ, д-р техн. наук, проф., ООО „Феррум“, Санкт-Петербург, Россия
В. М. МУСАЛИМОВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
А. А. ОЖИГАНОВ, д-р техн. наук, проф., АО «НИТИ „Авангард“», Санкт-Петербург, Россия
А. А. ПЫРКИН (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Б. В. СОКОЛОВ, д-р техн. наук, проф., СПбФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия
С. В. СОЛК, д-р техн. наук, НИИ ОЭП, Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия
Д. В. ТИТОВ, д-р техн. наук, доцент, ЮЗГУ, Курск, Россия
А. В. ФЕДОРОВ, д-р техн. наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Н. Б. ФИЛИМОНОВ (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
И. Б. ФУРТАТ, д-р техн. наук, доцент, ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия

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@itmo.ru

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

Подписано в печать 02.11.2022 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@itmo.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@itmo.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 (в т.ч. рисунки и таблицы), список литературы.

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.

Плата за публикацию не взимается.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Ершов Д. С., Хайруллин Р. З. Математическая модель рабочего места поверки средств измерений как нестационарная система обслуживания..... 701

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Сотникова С. Ю., Кононова Н. А., Ландер Л. Б., Цветков В. Э., Яловнаров С. В. Влияние печатных проводников на тепловой режим радиоэлектронных приборов.. 712

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Кузьменко В. П., Солёный С. В. Разработка модели цифрового двойника для гибридной производственной линии по сборке светодиодных осветительных приборов..... 725

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ, ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А., Кузиванов Д. О. Экспериментальное определение значимости статистической оценки параметров, характеризующих вторичные диагностические показатели акустической эмиссии..... 735

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Костюк Г. К., Степанюк Д. С., Шкуратова В. А., Петров А. А., Нестеров Н. А. Влияние структурирования плавящего кварца лазерно-индуцированной микроплазмой и очистки на функционирование многосекторных бинарных фазовых пластин..... 747

Скоробогатова О. А. Оценка взаимного влияния двух рупорных излучателей, возбуждаемых мощными широкополосными импульсами в X-диапазоне..... 763

EDITOR-IN-CHIEF

*Dr. Sci., Prof. ALEXEY BOBTSOV,
ITMO University, St. Petersburg, Russia*

EDITORIAL BOARD

ALESHKIN ANDREY, Dr. Sci., Prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
BELIKOV ANDREY, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
BESSMERTNY IGOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
BOGATYREV VLADIMIR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
EFANOV DMITRY, Dr. Sci., Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia
KLIMCHIK ALEXANDER, PhD, Ass. Prof., Innopolis University, Innopolis, Russia
KOLYUBIN SERGEY, Dr. Sci., Ass. Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
KONYAKHIN IGOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
KRISHTOP VIKTOR, Dr. Sci., Prof., PNRPU, Perm, Russia
LISITSYNA LYUBOV, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
LUKYANOV VALERY, Dr. Sci., Prof., Avangard JSC, St. Petersburg, Russia
LYAMIN ANDREY, Dr. Sci., Ass. Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia
MALOLETOV ALEXANDER, Dr. Sci., Prof., Innopolis University, Innopolis, Russia
MATVEEV YURIY, Dr. Sci., Speech Technology Center, St. Petersburg, Russia
MEDUNETSKY VIKTOR., Dr. Sci., Prof., Ferrum LLC, St. Petersburg, Russia
MUSALIMOV VIKTOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
OZHIGANOV ALEXANDER, Dr. Sci., Prof., SRTI Avangard JSC, St. Petersburg, Russia
PYRKIN ANTON, Dr. Sci., Prof., Deputy Editor-in-Chief, ITMO University, St. Petersburg, Russia
SOKOLOV BORIS, Dr. Sci., Prof., SPbFRC RAS, St. Petersburg, Russia
SOLK SERGEY, Dr. Sci., Research Institute of Optoelectronic Instrumentation, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia
TITOV DMITRY, Dr. Sci., Ass. Prof., SWSU, Kursk, Russia
FEDOROV ALEXEY, Dr. Sci., Ass. Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
FILIMONOV NIKOLAY, Dr. Sci., Prof., Deputy Editor-in-Chief, M. V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia
FURTAT IGOR, Dr. Sci., Ass. Prof., Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, St. Petersburg, Russia

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@itmo.ru

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 65

OCTOBER 2022

№ 10

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS, COMPUTER TECHNIQUE

- Ershov D. S., Khayrullin R. Z.** Mathematical Model of the Workplace of Measuring Instruments Verification as a Non-Stationary Service System 701

HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Sotnikova S. Yu., Kononova N. A., Lander L. B., Tsvetkov V. E., Yalovnarov S. V.** Influence of Printed Conductors on the Thermal Regime of Radio-Electronic Devices 712

TECHNOLOGY OF INSTRUMENT MANUFACTURING

- Kuzmenko V. P., Soleniy S. V.** Development of a Digital Twin Model for a Hybrid Production Line for LED Lighting Devices Assembly 725

INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS

- Altay Y., Fedorov A. V., Stepanova K. A., Kuzivanov D. O.** Experimental Determination of the Significance of Statistical Evaluation of Parameters Characterizing Secondary Diagnostic Indicators of Acoustic Emission..... 735

SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

- Kostyuk G. K., Stepanyuk D. S., Shkuratova V. A., Petrov A. A., Nesterov N. A.** Effect of Fused Quartz Structuring by Laser-Induced Microplasma and Purification on Multisector Binary Phase Plates Operation 747
- Skorobogatova O. A.** Assessment of the Mutual Influence of Two Horn Emitters Excited by Powerful Broadband Pulses in the X-Band 763

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@itmo.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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО МЕСТА ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ
КАК НЕСТАЦИОНАРНАЯ СИСТЕМА ОБСЛУЖИВАНИЯ

Д. С. ЕРШОВ^{1,3*}, Р. З. ХАЙРУЛЛИН^{2,3}

¹Московский политехнический университет, Москва, Россия

²Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

³Главный научный метрологический центр, Мытищи, Россия

*
ershov.metrolog@mail.ru

Аннотация. Представлена модель рабочего места поверки средств измерений как нестационарной системы обслуживания с относительными приоритетами поступающего потока заявок. Модель основывается на построении многомерного графа и соответствующей системы уравнений Чепмена—Колмогорова. Модель позволяет выявить и на качественном уровне объяснить основные закономерности и технологические параметры функционирования рабочего места. Представленную модель возможно использовать для расчета пропускной способности поступающих на поверку средств измерений, функционирующих в условиях изменяющейся рабочей нагрузки на определенном временном интервале. Также модель возможно применять для обоснования технических требований при проектировании рабочих мест, которые предполагается использовать в условиях изменяющейся рабочей нагрузки.

Ключевые слова: математическое моделирование, нестационарная система обслуживания, поверка, средство измерений, приоритетность обслуживания

Ссылка для цитирования: Ершов Д. С., Хайруллин Р. З. Математическая модель рабочего места поверки средств измерений как нестационарная система обслуживания // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 10. С. 701—711. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-701-711.

MATHEMATICAL MODEL OF THE WORKPLACE
OF MEASURING INSTRUMENTS VERIFICATION AS A NON-STATIONARY SERVICE SYSTEM

D. S. Ershov^{1,3*}, R. Z. Khayrullin^{2,3}

¹Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

²Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

³Main Scientific Metrological Center, Mytishi, Russia

*
ershov.metrolog@mail.ru

Abstract. A model of the workplace for measuring instruments verification as a non-stationary service system with relative priorities of the incoming flow of applications is presented. The model is based on a multidimensional graph construction and corresponding system of Chapman—Kolmogorov equations. The model makes it possible to identify and explain the main patterns and technological parameters of workplace functioning at a qualitative level. The presented model can be used to calculate the throughput of incoming measuring instruments operating under conditions of varying workload over a certain time interval. It is also possible to use the model to substantiate technical requirements when designing workplaces that are supposed to be used in conditions of changing workload.

Keywords: mathematical modelling, non-stationary service system, verification, measuring instrument, service priority

For citation: Ershov D. S., Khayrullin R. Z. Mathematical model of the workplace of measuring instruments verification as a non-stationary service system. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 10. P. 701—711 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-701-711.

Введение. В настоящее время в исследованиях различных проблем, задач и актуальных вопросов обеспечения единства измерений (ОЕИ) широко применяются методы математического моделирования. Вместе с тем большинство авторов в качестве инструмента моделирования используют теорию массового обслуживания (ТМО), достаточно широко применяют марковские и полумарковские модели для решения задач оценки и повышения эффективности процессов, функционирования различных систем и средств ОЕИ [1—8]. В этих работах авторы, применяя ТМО для моделирования, предполагают наличие такого режима функционирования системы, при котором коэффициент загрузки принимает значение ≤ 1 . Режим справедлив, когда средняя интенсивность поступления заявок ниже интенсивности их обслуживания.

Например, в работе [3] представлены результаты стохастического Р-бифуркационного анализа класса нелинейных марковских скачкообразных систем при комбинированных гармонических и случайных возбуждениях.

Пример использования метода регенеративных точек на основе полумарковской модели представлен в работе [4]. Рассмотрены два случая: с техническим обслуживанием основного блока и без него.

Система массового обслуживания с оптимальной политикой обработки приоритетных заявок рассмотрена в работе [7]. Обслуживается именно та заявка, которая системе приносит наилучший эффект (наибольший выигрыш) от ее обслуживания.

В работе [8] представлен подход к моделированию отказов и восстановлению серверов как системы массового обслуживания типа М/М/2, на вход которой поступает простейший поток событий, при этом имеются два канала обслуживания, один из которых доступен постоянно, а второй — с некоторыми перерывами.

Однако при моделировании процесса функционирования рабочего места (РМ) поверки средств измерений (СИ) в метрологическом подразделении наибольший практический интерес вызывают модели ТМО, позволяющие оценивать эффективность функционирования РМ в условиях перегрузки на некотором заранее заданном интервале времени — модели нестационарных систем обслуживания (НСО).

Основы теории НСО широко представлены в работах [9, 10]. В монографии [11] рассмотрены одноканальные и многоканальные НСО, описаны подходы к разработке динамических моделей НСО, а также приведены примеры некоторых элементарных моделей НСО.

В работе [12] представлены подходы к моделированию НСО с фиксированным количеством, поступающим на обслуживание в систему заявок на заранее заданных временных интервалах, с учетом некоторых предположений о законах распределения значений интенсивности поступления и обслуживания заявок.

В основу модели одноканальной НСО [13] положено преобразование Лапласа, также в этой работе представлен способ реализации принципа вероятностного баланса при составлении системы уравнений, описывающих состояния НСО.

Систематизации, а также анализу различных моделей НСО с конечными заявками, методам их расчета и правилам построения вероятностных и временных характеристик посвящена статья [14].

Программная реализация моделей НСО и анализ проблемных вопросов рассмотрены в [15].

Модели ТМО, которые относятся к классическим, не позволяют в случае совместных плановых и приоритетных поверок моделировать процесс функционирования РМ поверки СИ. Также возникновение пиковых нагрузок на рассматриваемом временном интервале указывает, что в данном случае требуется применение моделей НСО.

Таким образом, потребность в решении задач анализа, прогнозирования и оценки эффективности РМ поверки СИ в условиях реальных рабочих нагрузок, с одной стороны, и ограниченные теоретические возможности существующих методов и подходов к моделированию на основе классических моделей ТМО, с другой стороны, создают противоречие.

Постановка задачи. РМ поверки СИ, как правило, функционирует в плановом режиме на основании годовых, месячных, недельных планов. Однако на РМ зачастую поступают СИ, которые необходимо поверить в оперативном порядке, отодвинув плановые работы. Будем считать, что известно число образцов СИ, поступающих за определенный интервал времени для плановых и приоритетных поверок (при этом заявки второго типа имеют приоритет в обслуживании по отношению к плановым). РМ поверки СИ представим в виде одноканальной системы массового обслуживания с приоритетностью в обслуживании заявок и без потерь последних.

Приоритетные СИ поверяются в первую очередь, но при этом уже начатая поверка плановых СИ не прерывается. Предполагается, что используется экспоненциальный закон распределения поступления на поверку и самой поверки для каждой группы (типа) СИ, обладающих разной интенсивностью.

С целью определения наиболее важных характеристик функционирования РМ поверки СИ (таких как среднее время поверки всех или некоторых плановых и приоритетных СИ, вероятность срыва выполнения поверочных работ на РМ в установленные сроки и т.д.) необходимо разработать математическую модель РМ как одноканальную НСО с относительными приоритетами (НСО с ОП) и конечным числом СИ на определенном временном интервале.

Базовая модель. Для описания базовой модели [11—14] используется граф верхнетреугольной формы, на основании которого строится система уравнений Чепмена—Колмогорова. В любой момент времени состояние системы характеризуется парой целых чисел (i, j) , где i — число поступивших на поверку, но еще не поверенных СИ ($i = \overline{0, N}$), а j — число поступивших и поверенных к данному моменту времени СИ ($j = \overline{0, N-i}$). Суммарное количество состояний такой системы будет равно $N_{\text{сум}} = (N+1)(N+2)/2$. Система из $N_{\text{сум}}$ уравнений для нахождения вероятностей состояний имеет следующий вид [11—14]:

$$\frac{dP_{ij}(t)}{dt} = H(i)(P_{i-1,j}(t)\lambda_{i+1} - P_{ij}(t)\mu_{j+1}) + H(j)P_{i+1,j-1}(t)\mu_j - H(N-i-j)P_{ij}(t)\lambda_{i+j+1}, \quad (1)$$

$$\text{где } H(k) = \begin{cases} 1, & k > 0; \\ 0, & k \leq 0, \end{cases} \quad P_{ij}(0) = \begin{cases} 1, & i + j = 0; \\ 0, & i + j \neq 0. \end{cases}$$

НСО с относительными приоритетами. Для описания РМ поверки СИ как НСО с ОП введем следующие обозначения: p — число приоритетов обслуживания потоков (групп) СИ; $N = (N_1, \dots, N_p)$ — множество СИ, где N_p — подмножество СИ p -го приоритета; $I = (i_1, \dots, i_p)$ — множество СИ, которые поступили на поверку, но еще не поверены, где i_p — подмножество СИ, поступивших, но не поверенных, p -го приоритета; $J = (j_1, \dots, j_p)$ — множество СИ, которые поверены, где j_p — подмножество поверенных СИ p -го приоритета; $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_p)$ — множество значений интенсивности поступления на поверку СИ, где λ_p — подмножество значений интенсивности поступления СИ p -го приоритета, $\lambda_r = (\lambda_{r,1}, \dots, \lambda_{r,N_r})$;

$M = (\mu_1, \dots, \mu_p)$ — множество значений интенсивности поверки СИ, где μ_p — подмножество значений интенсивности поверки СИ p -го приоритета, $\mu_r = (\mu_{r,1}, \dots, \mu_{r,N_r})$; d — приоритет СИ, которое поверяется в текущий момент времени ($d = 0$ при $i = (0, \dots, 0)$); $k(i, j, d)$ — функция, отображающая параметры (порядковый номер) состояния системы.

С учетом замен:

$$\hat{k}(i, j, d, r) = k(i_1, \dots, i_r - 1, \dots, i_p, j_1, \dots, j_p, d \times H(\sum_{l=1}^p i_l - 1)),$$

$$\bar{k}(i, j, d) = k(i_1, \dots, i_r + 1, \dots, i_p, j_1, \dots, j_r - 1, \dots, j_p, d),$$

а также введенных обозначений система уравнений (1) будет иметь следующий общий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{k(i,j,d)}(t)}{dt} = & \sum_{r=1}^p \left[H(i_r) \times \lambda_{r,i_r+j_r} \times P_{\hat{k}(i,j,d,r)}(t) \right] + \\ & + H(d - \max_{i_r > 0}(r) + 1) \times \sum_{r=1}^p \left[H(j_r) \times \mu_{r,j_r} \times P_{\bar{k}(i,j,p)}(t) \right] - \\ & - \left(\sum_{r=1}^p \left[H(N_r - i_r - j_r) \cdot \lambda_{r,i_r+j_r+1} \right] + H(d) \cdot \mu_{d,j_d+1} \right) \times P_{k(i,j,d)}(t). \end{aligned} \quad (2)$$

В начальный момент времени РМ поверки СИ находится в „нулевом состоянии“ — количество всех СИ, поступивших на поверку, а также всех поверенных СИ, равно нулю. Вероятность нулевого состояния принимается равной единице, а вероятности всех остальных состояний принимаются равными нулю. После окончания всех поверок на РМ как НСО с ОП система должна прийти в конечное финальное состояние $(0, N_p, p_i)$ для $p_i = 1, 2, \dots, p$, и дальнейшие переходы состояний невозможны.

Модели, пригодные для практического решения задач анализа, прогнозирования и оценки эффективности РМ поверки СИ в условиях реальных нестационарных нагрузок, могут включать до нескольких десятков тысяч различных состояний. Поэтому необходимо применение алгоритмов формирования множества различных состояний, алгоритмов формирования множества переходов между состояниями и методов автоматизированного вывода уравнений [15]. Отметим, что учет относительных приоритетов в предлагаемой модели осуществляется за счет задания строгой и однозначной последовательности переходов, обеспечивающих выполнение заявок с более высоким приоритетом, в первую очередь. Из состояния, в котором количество поступивших на поверку приоритетных, но не поверенных СИ, отлично от нуля, возможны только переходы состояний, связанные с обслуживанием исключительно приоритетных заявок на поверку.

Рассмотрен простой пример, позволяющий выявить и проанализировать многие характерные закономерности функционирования НСО с ОП.

Пусть на плановую поверку поступает два СИ, а на приоритетную — одно СИ, которое имеет относительный приоритет в поверке. На рис. 1 приведен граф состояния РМ.

Предполагается, что интервалы времени поступления и поверки СИ описываются экспоненциальным законом распределения с интенсивностью $\{\lambda_1, \lambda_2\}$ и $\{\mu_1, \mu_2\}$ для плановых и приоритетных СИ соответственно. Обозначения в вершинах означают следующее: в первой строке — число поступивших плановых СИ, но не поверенных, через запятую — число поверенных; во второй строке — число подлежащих приоритетной поверке СИ, через запятую — число поверенных. Из данного примера видно, что состояния НСО с ОП различаются числом как плановых, так и приоритетных СИ. Эта особенность приводит к увеличению количества возможных состояний НСО с ОП до 18 (рис. 2), по сравнению с базовой моделью (шесть состояний).

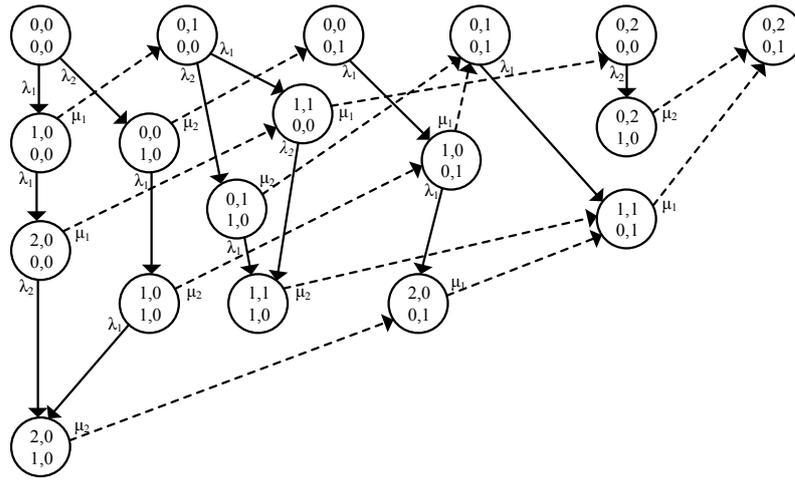


Рис. 1

С учетом выражения (2) для нахождения вероятностных состояний необходимо решить систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases}
 P_0'(t) = (-\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3) P_0(t) + \mu_1 P_1(t) + \mu_2 P_2(t) + \mu_3 P_3(t); \\
 P_1'(t) = (-\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \mu_1) P_1(t) + \lambda_1 P_0(t) + \mu_1 P_4(t) + \mu_2 P_7(t) + \mu_3 P_{10}(t); \\
 P_2'(t) = (-\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \mu_2) P_2(t) + \lambda_2 P_0(t) + \mu_1 P_5(t) + \mu_2 P_8(t) + \mu_3 P_{11}(t); \\
 P_3'(t) = (-\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \mu_3) P_3(t) + \lambda_3 P_0(t) + \mu_1 P_6(t) + \mu_2 P_9(t) + \mu_3 P_{12}(t); \\
 P_4'(t) = (-\lambda_2 - \lambda_3 - \mu_1) P_4(t) + \lambda_1 P_1(t); \\
 P_5'(t) = (-\lambda_1 - \lambda_3 - \mu_1) P_5(t) + \lambda_2 P_1(t) + \mu_1 P_{13}(t) + \mu_2 P_{16}(t) + \mu_3 P_{19}(t); \\
 P_6'(t) = (-\lambda_1 - \lambda_2 - \mu_1) P_6(t) + \lambda_3 P_1(t) + \mu_1 P_{14}(t) + \mu_2 P_{17}(t) + \mu_3 P_{20}(t); \\
 P_7'(t) = (-\lambda_2 - \lambda_3 - \mu_2) P_7(t) + \lambda_1 P_2(t); \\
 P_8'(t) = (-\lambda_1 - \lambda_3 - \mu_2) P_8(t) + \lambda_2 P_2(t); \\
 P_9'(t) = (-\lambda_1 - \lambda_2 - \mu_2) P_9(t) + \lambda_3 P_2(t) + \mu_1 P_{15}(t) + \mu_2 P_{18}(t) + \mu_3 P_{21}(t); \\
 P_{10}'(t) = (-\lambda_2 - \lambda_3 - \mu_3) P_{10}(t) + \lambda_1 P_3(t); \\
 P_{11}'(t) = (-\lambda_1 - \lambda_3 - \mu_3) P_{11}(t) + \lambda_2 P_3(t); \\
 P_{12}'(t) = (-\lambda_1 - \lambda_2 - \mu_3) P_{12}(t) + \lambda_3 P_3(t); \\
 P_{13}'(t) = (-\lambda_3 - \mu_1) P_{13}(t) + \lambda_2 P_4(t) + \lambda_1 P_5(t); \\
 P_{14}'(t) = (-\lambda_2 - \mu_1) P_{14}(t) + \lambda_3 P_4(t) + \lambda_1 P_6(t); \\
 P_{15}'(t) = (-\lambda_1 - \mu_1) P_{15}(t) + \lambda_3 P_5(t) + \lambda_2 P_6(t) + \mu_1 P_{22}(t) + \mu_2 P_{23}(t) + \mu_3 P_{24}(t); \\
 P_{16}'(t) = (-\lambda_3 - \mu_2) P_{16}(t) + \lambda_2 P_7(t) + \lambda_1 P_8(t); \\
 P_{17}'(t) = (-\lambda_2 - \mu_2) P_{17}(t) + \lambda_3 P_7(t) + \lambda_1 P_9(t); \\
 P_{18}'(t) = (-\lambda_1 - \mu_2) P_{18}(t) + \lambda_3 P_8(t) + \lambda_2 P_9(t); \\
 P_{19}'(t) = (-\lambda_3 - \mu_3) P_{19}(t) + \lambda_2 P_{10}(t) + \lambda_1 P_{11}(t); \\
 P_{20}'(t) = (-\lambda_2 - \mu_3) P_{20}(t) + \lambda_3 P_{10}(t) + \lambda_1 P_{12}(t); \\
 P_{21}'(t) = (-\lambda_1 - \mu_3) P_{21}(t) + \lambda_3 P_{11}(t) + \lambda_2 P_{12}(t); \\
 P_{22}'(t) = -\mu_1 P_{22}(t) + \lambda_3 P_{13}(t) + \lambda_2 P_{14}(t) + \lambda_1 P_{15}(t); \\
 P_{23}'(t) = -\mu_2 P_{23}(t) + \lambda_3 P_{16}(t) + \lambda_2 P_{17}(t) + \lambda_1 P_{18}(t); \\
 P_{24}'(t) = -\mu_3 P_{24}(t) + \lambda_3 P_{19}(t) + \lambda_2 P_{20}(t) + \lambda_1 P_{21}(t)
 \end{cases}$$

с начальными условиями:

$$t = 0; \quad P_0(0) = 1; \quad P_k(0) = 0, \quad k = (\overline{1,17})$$

и условием нормирования:

$$\sum_{i=0}^I p_i = 1, \quad i = (\overline{0,17}).$$

Результаты численного моделирования. Рассматриваемый временной интервал — 30 дней. Основные исходные данные, использовавшиеся в расчетах, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Интенсивность поступления СИ на поверку и поверки СИ,
а также соответствующие параметры загрузки РМ**

Вариант	λ_1	μ_1	λ_2	μ_2	k_1	k_2
1	0,65	0,7	0,65	0,7	0,929	0,929
2	0,65	0,7	0,5	0,8	0,929	0,625
3	0,65	0,7	0,4	0,9	0,929	0,444
4	0,45	0,7	0,4	0,9	0,643	0,444

Вероятность различных состояний НСО рассчитана в математической инженерной программе Mathcad Prime 4.0.

На рис. 2 и 3 представлены результаты для вариантов 1 и 2 из табл. 1 сравнительного анализа вероятностей нахождения в различных состояниях для моделей, учитывающих только приоритетные заявки — S_10 и S_01, только обычные заявки — S_10 и S_01, а также для НСО с ОП — S_2010 и S_0201.

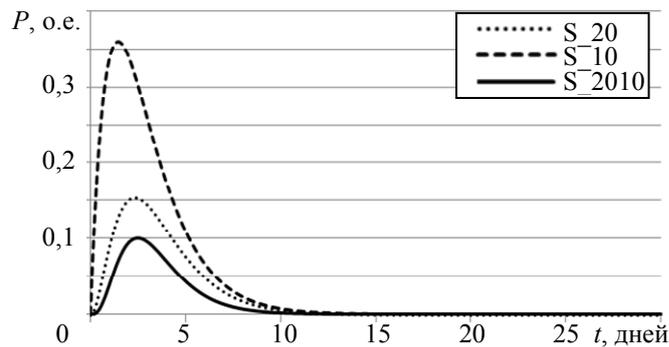


Рис. 2

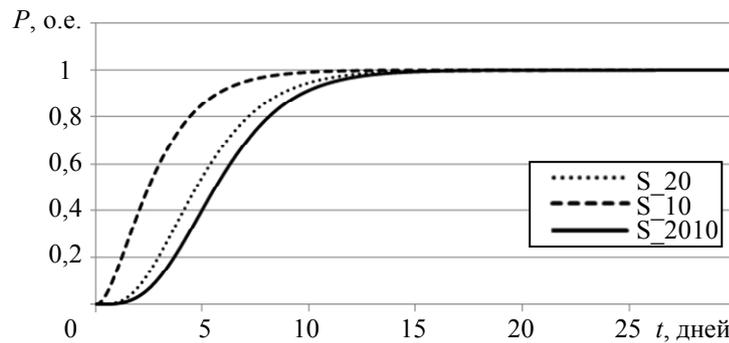


Рис. 3

Видно, что значения вероятности, полученные моделью НСО, не являются суммой моделей с приоритетными и плановыми заявками. Таким образом, модель НСО позволяет получать качественно новые результаты.

С целью оценки времени выхода на финальное состояние S_0201 (свободное состояние) было проведено сравнение вариантов 1, 2 и 3 (рис. 4).

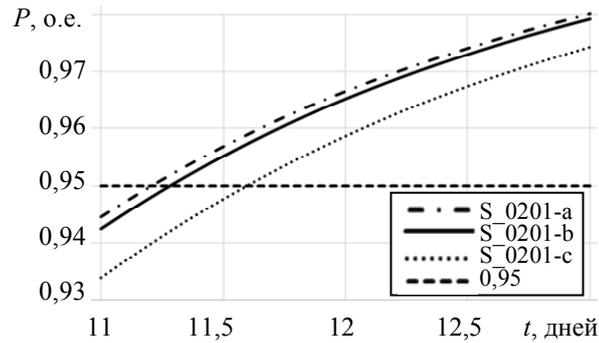


Рис. 4

Время перехода в свободное состояние характеризует степень загруженности РМ: время вхождения графика функции $P_{02/01}(t)$ в 5 %-ную область финального значения (кривая 0,95 на рис. 4). Видно, что для варианта 1 оценка момента времени перехода в свободное состояние меньше, чем для других вариантов. Описанный эффект зависит от собственных значений матрицы системы уравнений (2). Проведенный анализ показал, что для варианта 1 матрица системы (2) имеет одно нулевое собственное значение и семнадцать отрицательных: $-0,65; -0,65; -0,65; -0,7; -0,7; -0,7; -0,7; -0,7; -1,30; -1,30; -1,35; -1,35; -1,35; -1,35; -1,35; -2$ (равных линейным комбинациям значений интенсивности $\{\lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2\}$ с отрицательными коэффициентами). Известно, что скорость увеличения вероятности $P_{02/01}(t)$ до единицы определяется наименьшим по модулю отрицательным собственным значением. Отметим, что наименьшее по модулю отрицательное собственное значение имеет матрица для варианта 1.

С целью оценки влияния загруженности РМ на своевременность проведения проверок на рис. 5 представлены вероятности состояний S_{2010} для разных вариантов. Параметр загруженности (согласованности входящего и исходящего потоков) равен отношению интенсивности поступающего потока к интенсивности потока. Для рассмотренных вариантов параметры загруженности приведены в последних двух столбцах табл. 1.

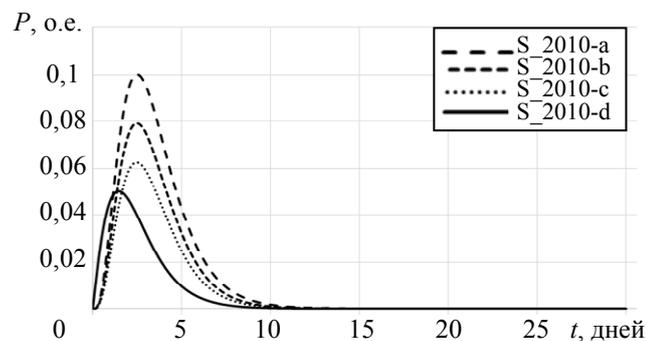


Рис. 5

Видно, что наибольшее значение вероятности достигается для исходных данных варианта 1, который характеризуется наибольшей загруженностью как по плановым, так и по приоритетным поверкам. Наименьшее значение вероятности достигается для исходных данных варианта 4 с наименьшей загруженностью. Отметим также, что максимальное значение вероятности для варианта 4 достигается раньше, чем для вариантов 3, 2 и 1, т.е. среднее время ожидания проверок для исходных данных варианта 4 меньше, чем для других вариантов.

Во всех рассмотренных выше случаях с целью выявления общих закономерностей изменения вероятностей состояний за начальное принималось „нулевое состояние“: его вероятность принималась равной единице, а вероятность остальных состояний принималась равной

нулю. Как показали расчеты, при таких условиях система достаточно быстро переходит в свободное состояние и остается недозагруженной.

В действительности при планировании проверок СИ стремятся загружать РМ относительно равномерно. Если выбрать интервал времени в один месяц и предположить, что состояние системы „обнуляется“ в начале каждой календарной недели, то зависимость вероятности ожидания проверки (сумма вероятностей состояний S_{2010} и S_{1110}) на рассматриваемом интервале времени имеет вид, представленный на рис. 6.

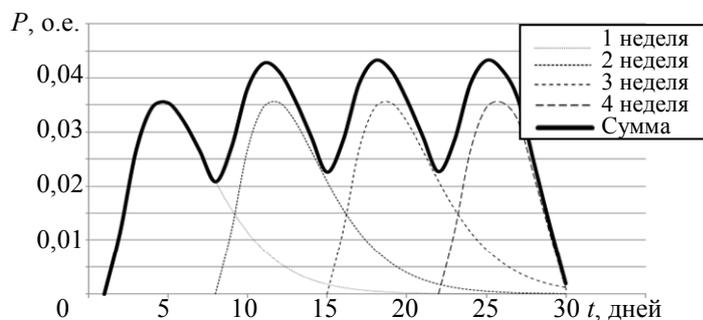


Рис. 6

Видно, что загрузка РМ становится более равномерной в течение всего месяца, по сравнению с вариантами, изображенными на рис. 3 и 6. Если „обнуление состояний“ производить чаще одного раза в неделю, то равномерность загрузки РМ будет только увеличиваться. Однако при этом момент выхода вероятности свободного состояния в 5 %-ную область финального значения будет возрастать (момент времени, когда все поступившие на проверку приоритетные и плановые СИ будут поверены к концу заданного интервала времени).

Отметим, что в табл. 1 значения интенсивности поступления СИ на проверку меньше значений интенсивности проверки СИ. Такие режимы, как было отмечено во введении, характерны для классических систем ТМО. Рассмотрим для примера несколько других вариантов исходных данных по значениям интенсивности поступления на проверку СИ и интенсивности их проверки на РМ (табл. 2).

Таблица 2

Значения интенсивности поступления и проверки СИ				
Вариант	λ_1	λ_2	μ_1	μ_2
1	0,8	0,75	0,65	0,48
2	0,4	0,8	0,5	0,75
3	0,5	0,5	0,5	0,5

В первом варианте (см. табл. 2) интенсивность проверки плановых и приоритетных СИ ниже интенсивности поступления на проверку, что говорит о высокой вероятности возникновения в системе в данном случае пиковой загруженности. Во втором варианте интенсивность поступления плановых СИ на проверку ниже интенсивности проверки плановых СИ; а интенсивность поступления приоритетных СИ выше интенсивности их проверки. В третьем варианте интенсивность поступления на проверку плановых и приоритетных СИ равна интенсивности их проверки.

Расчет вероятностных состояний НСО для значений интенсивности поступления на проверку и проверки СИ, представленных в табл. 2, выполнен в программе Mathcad Prime 4.0.

Так, например, зависимость значения вероятности проверки всех СИ, которые поступили в систему, от времени для варианта 1 (см. табл. 2) представлена на рис. 7; для варианта 2 — на рис. 8; для варианта 3 — на рис. 9.

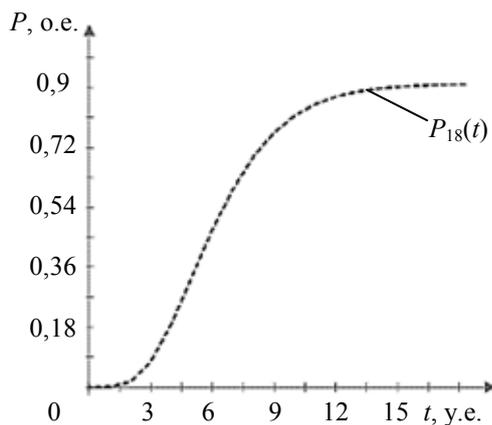


Рис. 7

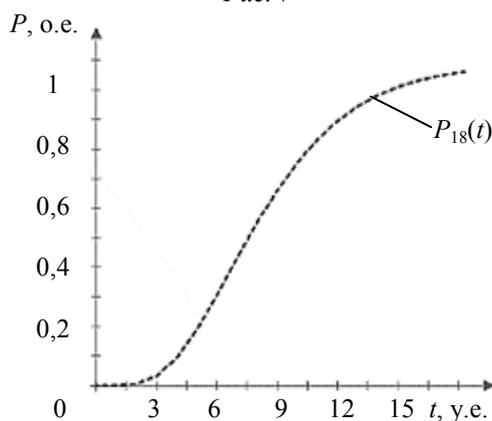


Рис. 8

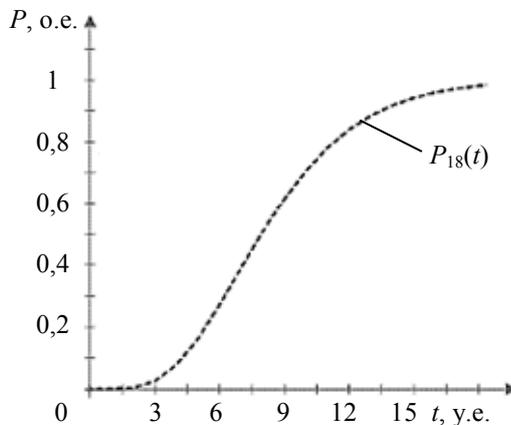


Рис. 9

Заключение. В работе представлена модель РМ поверки СИ как НСО с ОП поступающего потока заявок на поверку. Модель основывается на построении многомерного графа и соответствующей системы уравнений Чепмена—Колмогорова. В работе реализована простая модель РМ поверки СИ как НСО с ОП, позволяющая выявить и на качественном уровне объяснить основные закономерности функционирования РМ и оценить технологические параметры функционирования.

Представленную модель возможно использовать для расчета характеристик рабочего места по пропускной способности поступающих на поверку СИ, функционирующих в условиях изменяющейся рабочей нагрузки на директивно определенном временном интервале. Также данную модель возможно применять для обоснования технических требований при проектировании перспективных РМ, которые предполагается использовать в условиях изменяющейся рабочей нагрузки на определенном интервале времени.

Возможность задавать разные значения интенсивности при переходах состояний системы позволяет в разработанной модели рассматривать интенсивность как управляющее воздействие. Управление интенсивностью проверок может быть использовано для обеспечения тех или иных технических и технологических требований к РМ поверки СИ.

Результаты анализа возможностей и особенностей программной реализации [15] моделей НСО из других предметных областей позволяют сделать вывод о перспективности применения разработанной в статье модели для моделирования процесса реального функционирования РМ как НСО с ОП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kampen J. K.* Reflections on and test of the metrological properties of summated rating, Likert, and other scales based on sums of ordinal variables // *Measurement*. 2019. Vol. 137. P. 428—434. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.083>.
2. *Chen H. B., Zhuang H. L.* A new highly anti-interference regularization method for ill-posed problems // *Vibroengineering PROCEDIA*. 2017. Vol. 15. P. 128—133. <http://dx.doi.org/10.21595/vp.2017.19358>.
3. *Wei W., Wei X., Jiankang L.* Stochastic P-bifurcation analysis of a class of nonlinear Markov jump systems under combined harmonic and random excitations // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2021. Vol. 582. P. 126246. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126246>.
4. *Neama S., Youssef T.* Comparison of fuzzy semi-Markov models for one unit with mixed stand by units with and without preventive maintenance using regenerative point method // *Heliyon*. 2021. Vol. 7, N 8. P. e07717. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07717>.
5. *Khayrullin R. Z., Zakutin A. A.* Application of the Bayesian Approach to the Construction of Statistical Estimates of Parameters of Distribution Laws of Random Variables // *Measurement Techniques*. 2021. Vol. 63. P. 862—869. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01872-x>.
6. *Bessiere P., Mazer E., Ahuactzin J. M., Mekhnacha K.* Bayesian Programming. Boca Raton: CRC Press, 2014. <https://doi.org/10.1201/b16111>.
7. *Yan Su, Junping Li.* Bias optimality of admission control in a non-stationary repairable queue // *Operations Research Letters*. 2020. Vol. 48, is. 3. P. 317—322. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2020.04.002>.
8. *Seenivasana M., Senthilkumara R., Subasrib K. S.* M/M/2 heterogeneous queueing system having unreliable server with catastrophes and restoration // *Intern. Conf. on Advances in Materials Science*. 2022. Vol. 51, Part 8. P. 2332—2338. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.567>.
9. *Хинчин А. Я.* Работы по математической теории массового обслуживания. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1963. 236 с.
10. *Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н.* Введение в теорию массового обслуживания. М.: Наука, 1966. 432 с.
11. *Бубнов В. П., Сафонов В. И.* Разработка динамических моделей нестационарных систем обслуживания. СПб: Лань, 1999. 64 с.
12. *Бубнов В. П., Тырва А. В., Еремин А. С.* Комплекс моделей нестационарных систем обслуживания с распределением фазового типа // *Труды СПИИРАН*. 2014. Вып. 37. С. 61—71.
13. *Смагин В. А., Гусеница Я. Н.* К вопросу моделирования одноканальных нестационарных систем с произвольным распределением моментов времени поступления заявок и длительностей их обслуживания // *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2015. № 649. С. 56—53.
14. *Бубнов В. П., Сафонов В. И., Шардаков К. С.* Обзор существующих моделей нестационарных систем обслуживания и методов их расчета // *Системы управления, связи и безопасности*. 2020. № 3. С. 65—121.
15. *Бубнов В. П., Еремин А. С., Сергеев С. А.* Особенности программной реализации численно-аналитического метода расчета моделей нестационарных систем обслуживания // *Труды СПИИРАН*. 2015. № 1(38). С. 218—228.

Сведения об авторах

Денис Сергеевич Ершов

— канд. техн. наук; Московский политехнический университет, кафедра стандартизации, метрологии и сертификации; Главный научный метрологический центр, научно-исследовательский отдел;
E-mail: ershov.metrolog@mail.ru

Рустам Зиннатуллович Хайруллин — д-р физ.-мат. наук; Главный научный метрологический центр, научно-исследовательский отдел; Московский государственный строительный университет, кафедра фундаментального образования; E-mail: zrkzrk@list.ru

Поступила в редакцию 29.06.2022; одобрена после рецензирования 19.07.2022; принята к публикации 31.08.2022.

REFERENCES

1. Kampen J.K. *Measurement*, 2019, vol. 137, pp. 428–434, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.083>.
2. Chen H.B., Zhuang H.L. *Vibroengineering PROCEDIA*, 2017, vol. 15, pp. 128–133, <http://dx.doi.org/10.21595/vp.2017.19358>.
3. Wei W., Wei X., Jiankang L. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2021, vol. 582, pp. 126246, <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126246>.
4. Neama S., Youssef T. *Heliyon*, 2021, vol. 7, pp. e07717, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07717>.
5. Khayrullin R.Z., Zakutin A.A. *Measurement Techniques*, 2021, vol. 63, pp. 862–869, <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01872-x>.
6. Bessiere P., Mazer E., Ahuactzin J.M., Mekhnacha K. *Bayesian Programming*, CRC Press, Boca Raton, 2014, <https://doi.org/10.1201/b16111>.
7. Yan Su, Junping Li, *Operations Research Letters*, 2020, no. 3(48), pp. 317–322, <https://doi.org/10.1016/j.orl.2020.04.002>.
8. Seenivasana M., Senthilkumara R., Subasrib K.S. *International Conference on Advances in Materials Science*, 2022, no. 8(51), pp. 2332–2338, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.567>.
9. Khinchin A.Ya. *Raboty po matematicheskoy teorii massovogo obsluzhivaniya* (Works on the Mathematical Theory of Queuing), Moscow, 1963, 236 p. (in Russ.)
10. Gnedenko B.V., Kovalenko I.N. *Vvedeniye v teoriyu massovogo obsluzhivaniya* (Introduction to Queuing Theory), Moscow, 1966, 432 p. (in Russ.)
11. Bubnov V.P., Safonov V.I. *Razrabotka dinamicheskikh modeley nestatsionarnykh sistem obsluzhivaniya* (Development of Dynamic Models of Non-Stationary Service Systems), St. Petersburg, 1999, 64 p. (in Russ.)
12. Bubnov V., Tyrva A., Eremin A. *Informatics and Automation* (SPIIRAS Proceedings), 2014, no. 37, pp. 61–71. (in Russ.)
13. Smagin V.A., Gusenitsa Ya.N. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2015, no. 649, pp. 56–53. (in Russ.)
14. Bubnov V.P., Safonov V.I., Shardakov K.S. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 3, pp. 65–121. (in Russ.)
15. Bubnov V.P., Eremin A.S., Sergeev S.A. *Informatics and Automation* (SPIIRAS Proceedings), 2015, no. 1(38), pp. 218–228. (in Russ.)

Data on authors

- Denis S. Ershov** — PhD; Moscow Polytechnic University, Department of Standardization, Metrology, and Certification; Main Scientific Metrological Center, Research Department; E-mail: ershov.metrolog@mail.ru
- Rustam Z. Khayrullin** — Dr. Sci.; Main Scientific Metrological Center, Research Department; Moscow State University of Civil Engineering, Department of Fundamental Education; E-mail: zrkzrk@list.ru

Received 29.06.2022; approved after reviewing 19.07.2022; accepted for publication 31.08.2022.

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

УДК 621.3, 536.2
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-712-724

ВЛИЯНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПРОВОДНИКОВ НА ТЕПЛОВЫЙ РЕЖИМ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

С. Ю. Сотникова*, Н. А. Кононова, Л. Б. Ландер,
В. Э. Цветков, С. В. Яловнаров

Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Москва, Россия
**natakon14@yandex.ru*

Аннотация. Исследовано влияние трассировки печатных проводников на тепловые режимы печатных узлов в составе радиоэлектронных приборов (РЭП). Показано, что отсутствие учета теплового процесса в медных печатных проводниках при оценке теплового режима плат на этапе разработки может привести к большим ошибкам в оценке надежности РЭП. Для компьютерного моделирования тепловых режимов использовалась широко распространенная система автоматизированного проектирования SolidWorks. Сравнение результатов моделирования печатного узла дальномера с данными эксперимента позволило доказать необходимость учета тепловых процессов в печатных проводниках при проведении моделирования РЭП. Показано, что обычно используемые тепловые модели печатных узлов, выполненные без учета металлизации, могут привести к погрешности в определении температуры электрорадиоэлементов до 22 %. Это не дает возможности правильно принять решение по обеспечению надежности РЭП.

Ключевые слова: радиоэлектронные приборы, печатные узлы, трассировка, металлизация, тепловые процессы, отвод тепла, обеспечение надежности

Ссылка для цитирования: Сотникова С. Ю., Кононова Н. А., Ландер Л. Б., Цветков В. Э., Яловнаров С. В. Влияние печатных проводников на тепловой режим радиоэлектронных приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 10. С. 712—724. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-712-724.

INFLUENCE OF PRINTED CONDUCTORS ON THE THERMAL REGIME OF RADIO-ELECTRONIC DEVICES

S. Yu. Sotnikova*, N. A. Kononova, L. B. Lander,
V. E. Tsvetkov, S. V. Yalovnarov

HSE University, Moscow, Russia
**natakon14@yandex.ru*

Abstract. The effect of printed conductors tracing on the thermal modes of printed components of radio-electronic devices is investigated. It is shown that the failure to take into account the thermal process in copper printed conductors when assessing the thermal regime of boards at the development stage can lead to large errors in assessing the radio-electronic device reliability. For computer simulation of thermal regimes, the widely used computer-aided design system SolidWorks is used. Comparison of the results of modeling the printed circuit assembly of the rangefinder with the experimental data makes it possible to prove the need to take into account thermal processes in printed conductors when simulating the radio-electronic devices. It is demonstrated that the commonly used thermal models of printed circuit assemblies, which do not take into account metallization, may lead to an error in determining the temperature of electronic elements up to 22 %. This does not make it possible to make a correct decision on ensuring the reliability of the radio-electronic devices.

Keywords: electronic devices, printed circuit assembly, tracing, metallization, thermal processes, heat removal, reliability assurance

© Сотникова С. Ю., Кононова Н. А., Ландер Л. Б., Цветков В. Э., Яловнаров С. В., 2022

For citation: Sotnikova S. Yu., Kononova N. A., Lander L. B., Tsvetkov V. E., Yalovnarov S. V. Influence of printed conductors on the thermal regime of radio-electronic devices. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 10. P. 712—724 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-712-724.

Введение. Одним из важных факторов, который должен учитываться при обеспечении надежности радиоэлектронных приборов (РЭП), считается тепловое воздействие на свойства конструктивных материалов и электрорадиоэлементов (ЭРЭ) [1]. Нагрев ЭРЭ обусловлен как температурой окружающего воздуха и соседних частей РЭП, так и выделением тепловой энергии в ЭРЭ и в печатных проводниках [2, 3]. Поэтому при обеспечении надежности РЭП в формулы расчета, наряду с табличными значениями интенсивности отказов ЭРЭ, обычно вводят поправочные коэффициенты, зависящие от температурных режимов работы элементов [4]. Во время эксплуатации РЭП могут прийти в нерабочее состояние из-за отклонения рабочих температур ЭРЭ от расчетных проектных значений.

В настоящей статье решена задача учета в тепловых моделях РЭП топологии печатных проводников, которые могут влиять на точность вычисления истинных значений температуры ЭРЭ. Проведенные исследования показали, что компьютерное моделирование тепловых режимов позволяет определить запасы по температуре ЭРЭ уже на ранних этапах проектирования РЭП до их изготовления и проведения испытаний [5, 6].

К настоящему времени разработано множество программных продуктов для моделирования тепловых процессов [7]. Однако до сих пор не все разработчики РЭП владеют информацией о роли теплового процесса в проводниках, реализующих принципиальную электрическую схему РЭП на печатных платах. Поэтому они пренебрегают учетом этой части теплового процесса при построении полных расчетных тепловых моделей печатных узлов, которые составляют основу конструкций РЭП [8, 9]. Это часто приводит к получению расчетного теплового режима, значительно отличающегося от действительного. Тогда на этапе сдаточных испытаний или при эксплуатации наступает отказ РЭП.

Следует также учесть, что использование металлизации печатных плат в качестве способа охлаждения — перспективный метод, позволяющий на 5 % и более увеличить отвод тепла от нагретых областей [10, 11], что также необходимо учитывать при построении тепловых моделей РЭП.

В настоящей работе исследование влияния печатных проводников на тепловой режим РЭП сопровождается рассмотрением примера лазерного дальномера, который часто встраивается в сложную систему навигации и управления (к ее надежности и точности работы предъявляются повышенные требования). Даже небольшое повышение температуры прибора может привести к отказу (постепенному или внезапному) или к существенному снижению точности работы прибора.

Целью настоящих исследований является сравнение экспериментальных и получаемых моделированием значений температуры ЭРЭ печатных узлов РЭП.

На примере дальномера показывается, как учесть погрешности моделирования (с учетом в тепловой модели наличия печатных медных проводников и без учета) для принятия решений об установлении максимально допустимых значений коэффициентов тепловых нагрузок ЭРЭ, чтобы обеспечить требуемую надежность РЭП на ранних этапах их проектирования.

Для достижения этой цели авторами настоящей работе принято решение:

- рассмотреть компьютерное тепловое моделирование одного из печатных узлов конкретного лазерного дальномера;
- провести экспериментальные исследования тепловых процессов реального дальномера с учетом задания внешних тепловых воздействий, близких к условиям эксплуатации;

— оценить точность результатов моделирования печатного узла лазерного дальномера с учетом и без учета влияния печатных проводников, включая участки свободной металлизации;

— оценить погрешность определения коэффициента тепловой нагрузки ЭРЭ при максимальной рабочей температуре эксплуатации дальномера.

Первый этап: моделирование тепловых процессов в общей конструкции РЭП. При анализе тепловых процессов в печатных узлах, входящих в РЭП, необходимо сначала рассмотреть тепловую модель всего РЭП в корпусе, а затем, определив граничные условия для каждого печатного узла, приступить к моделированию. Таким образом реализуется иерархический подход [12, 13], который позволяет уточнить значения температуры внутри корпуса прибора для того, чтобы затем точнее определить температуру ЭРЭ на печатных платах.

На первом этапе моделирования используется подсистема АСОНИКА-Т, позволяющая оперативно строить и рассчитывать тепловые модели произвольных конструкций РЭП в виде ненаправленных графов, которые имеют вид электрических цепей, построенных на основе метода электротепловых аналогий [14].

Для построения модели тепловых процессов в виде топологического графа вся конструкция РЭП разбивается на условно изотермические части, каждая из которых представляется в модели отдельным узлом графа (рис. 1). Значения температуры этих частей РЭП в узлах модели рассчитываются в результате моделирования с помощью подсистемы АСОНИКА-Т. Тепловые взаимодействия между выделенными частями конструкции, а также с воздушной средой внутри и снаружи блока, показаны ветвями, представляющими собой тепловые сопротивления теплопроводности, конвекции и излучения (на рис. 1 они изображены сплошными, пунктирными и волнистыми ветвями соответственно).

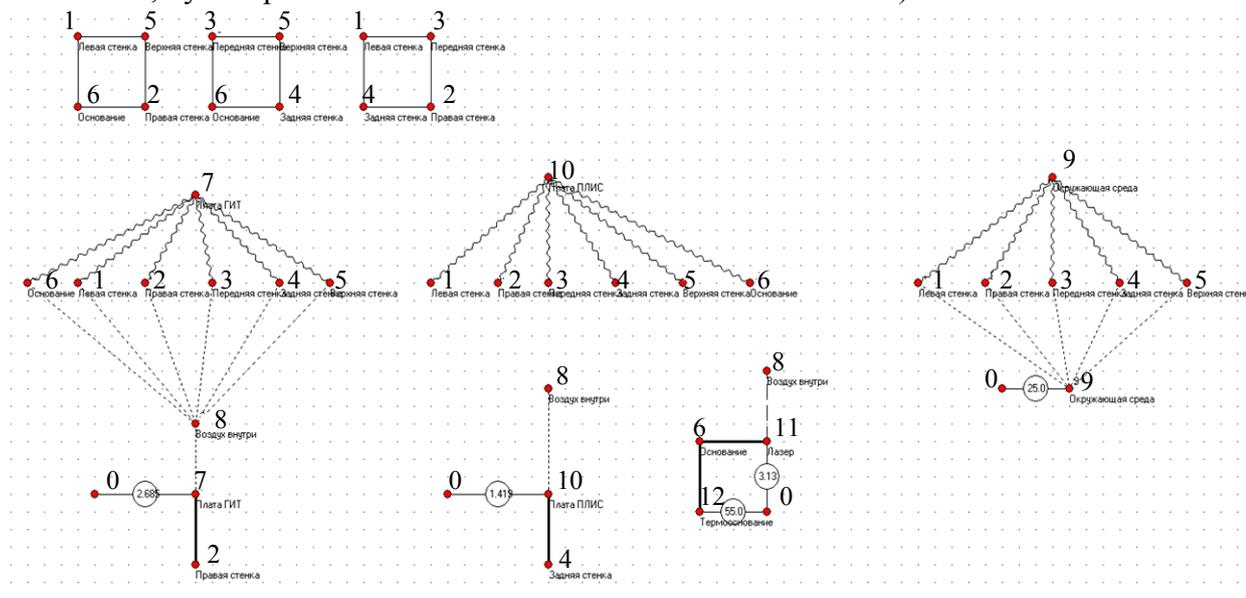


Рис. 1

В случае, если РЭП — дальномер, предлагается следующая идеализация конструкции блока для построения модели тепловых процессов в нем. Корпус дальномера имеет форму параллелепипеда, и каждая грань корпуса принимается изотермичной во всем своем объеме. Поэтому в тепловой модели, показанной на рис. 1, каждой грани соответствует один узел (они пронумерованы от 1 до 6). Повторение номера узла в изображении модели программа подсистемы АСОНИКА-Т воспринимает как один узел, условно расщепленный на несколько узлов для удобства контроля наличия всех ветвей модели. Воздух внутри корпуса считается также изотермичным (узел 8), он омывает три источника тепловыделений: два печатных узла с номерами 7 и 10 и излучающий твердотельный лазер (узел 11). Теплообмен конвекцией и излучением с торцов печатных плат не учитывается из-за малости площади их общей поверхности.

Лазер, закрепленный на основании блока, участвует с ним в контактном теплообмене (сплошная полужирная ветвь 6—11). Основание, в свою очередь, имеет контактный теплообмен с термооснованием (ветвь 6—12), имеющим постоянно поддерживаемую температуру 55 °С. Выделяемые мощности лазера и двух печатных узлов внутри корпуса представлены в виде источников тепловыделений (ветви 11—0, 7—0 и 10—0). Заданы теплообмен конвекцией и излучением от стенок корпуса блока в окружающий воздух (узел 9). От печатных узлов конвекцией тепло идет в воздух внутри блока (узел 8) и контактным теплообменом к стенкам, к которым они крепятся (узлы 2 и 4). Заданные значения температуры термооснования и окружающей среды присутствуют в модели в виде источников тепла (ветви 12—0 и 9—0).

Моделирование тепловых режимов дальномера было проведено для температуры окружающей среды 25 (рис. 2, а) и 55 °С (б). Полученные распределения температур в дальномере как результаты его моделирования представлены в виде таблиц. Температура воздуха внутри блока, которая требуется для задания в качестве граничного условия при моделировании печатного узла генератора импульсов тока (ГИТ), рассматриваемого далее, составляет 53,2 и 57 °С для двух вариантов эксплуатации.

№ узла	Имя узла	Температура, °С
1	Левая стенка	51.1
2	Правая стенка	52.9
3	Передняя стенка	51.2
4	Задняя стенка	52.1
5	Верхняя стенка	50.2
6	Основание	55
7	Плата ГИТ	54.9
8	Воздух внутри	53.2
9	Окружающая среда	25
10	Плата ПЛИС	54.9
11	Лазер	55.5
12	Термооснование	55

№ узла	Имя узла	Температура, °С
1	Левая стенка	56.5
2	Правая стенка	58.1
3	Передняя стенка	56.6
4	Задняя стенка	57.4
5	Верхняя стенка	57.1
6	Основание	55.1
7	Плата ГИТ	60
8	Воздух внутри	57
9	Окружающая среда	55
10	Плата ПЛИС	60.1
11	Лазер	55.6
12	Термооснование	55

Рис. 2

Второй этап: исследование тепловых процессов печатного узла РЭП. В настоящей работе исследование тепловых процессов одного из печатных узлов дальномера проводилось с помощью системы автоматизированного проектирования SolidWorks. Плата этого узла содержит шесть слоев металлизации, выполненных из меди. Было построено три модели печатной платы:

- с учетом топологии печатных проводников верхнего и нижнего слоев металлизации платы и с учетом средневзвешенного значения коэффициентов теплопроводности стеклотекстолита и меди оставшихся внутренних слоев многослойной печатной платы;
- без учета топологии верхнего и нижнего слоев, но с учетом средневзвешенного значения коэффициентов теплопроводности всех слоев многослойной печатной платы;
- без учета топологии верхнего и нижнего слоев и без учета наличия медных слоев в плате, т.е. с учетом только теплопроводности стеклотекстолита.

За основу построения тепловой модели платы генератора импульсов тока с учетом печатных проводников печатного узла была взята его топология из САПР Altium Designer. По реальным размерам (100×44×2 мм) создан компьютерный прототип конструкции платы, добавлены печатные проводники в соответствии с топологией с верхней и нижней сторон в виде отдельных участков толщиной 50 мкм, разработаны прототипы моделей, установленных на плате ЭРЭ. Далее плата, печатные проводники и ЭРЭ объединены в общую сборку платы.

На рис. 3 представлен полученный полный компьютерный прототип конструкции печатного узла. Для каждого ЭРЭ описываются теплофизические свойства материала. Они выбираются из базы данных или, при необходимости, создаются с нуля.

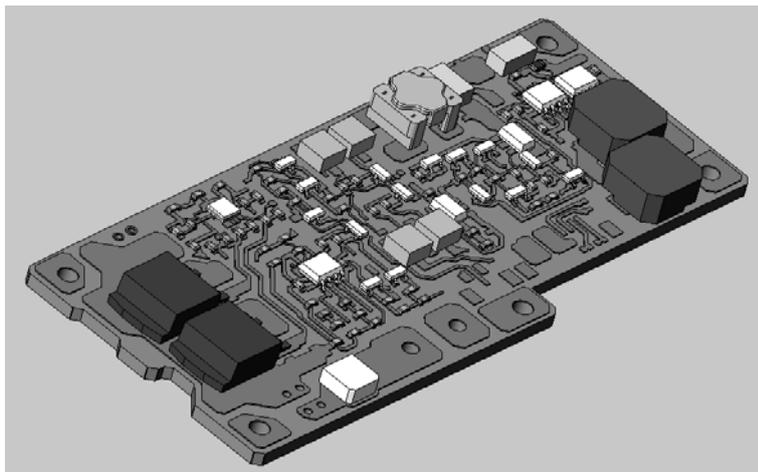


Рис. 3

С целью сокращения времени построения расчетной сетки было принято решение не создавать внутренние проводящие слои топологии в качестве отдельных тел в SolidWorks, а задать эффективную теплопроводность материала платы с учетом наличия внутренней металлизации, т.е. средневзвешенное значение коэффициентов теплопроводности стеклотекстолита и меди [15, 16].

При условии, что печатные проводники достаточно однородно распределены внутри платы, расчет эффективного коэффициента теплопроводности для n -слойной печатной платы может быть проведен по формуле [17]:

$$\lambda_3 = \lambda_{\text{пт}} + K_3 (n\delta_{\text{пр}} / (n-1)\delta_{\text{пт}}) \lambda_{\text{пр}},$$

где $\lambda_{\text{пт}}$ — коэффициент теплопроводности печатной платы; K_3 — среднее значение коэффициента заполнения печатной платы проводниками по всем слоям; $\delta_{\text{пр}}$ — толщина проводящего слоя; $\delta_{\text{пт}}$ — толщина слоя стеклотекстолита печатной платы; $\lambda_{\text{пр}}$ — коэффициент теплопроводности проводящих слоев.

Для расчета коэффициента заполнения печатной платы в SolidWorks выполнены эскизы геометрического рисунка внутренних слоев платы. Пример процесса измерения площади полигона внутреннего слоя приведен на рис. 4. При подсчете площади, занимаемой металлизацией, использовался инструмент „анализировать“.

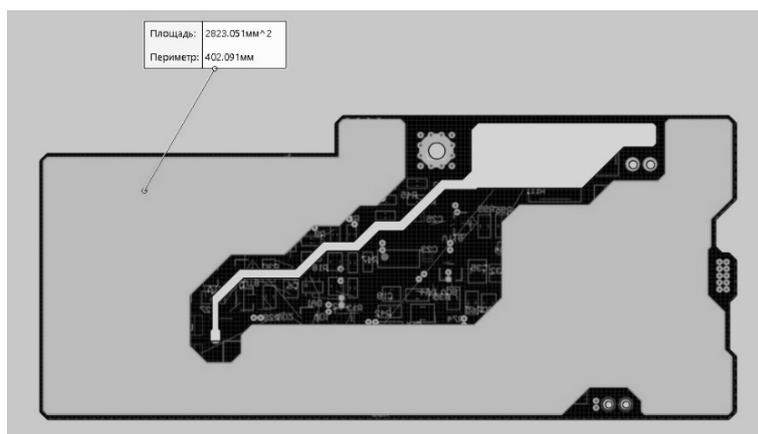


Рис. 4

Коэффициент заполнения печатной платы проводниками: $K_3 = 0,68$. При следующих исходных данных материалов печатной платы: стеклотекстолит FR-4 $\delta_{\text{пт}} = 0,34$ мм,

$\lambda_{\text{пш}} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и медь $\delta_{\text{пр}} = 0,05 \text{ мм}$, $\lambda_{\text{пр}} = 390 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, число слоев 9, эффективный коэффициент теплопроводности составил

$$\lambda_3 = 0,2 + 0,68 \cdot ((4 \cdot 0,05) / 5 \cdot 0,34) \cdot 390 = 31,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

Таким образом, при подготовке к моделированию в программе SolidWorks задан материал печатной платы с рассчитанным (и внесенным вручную) эффективным коэффициентом теплопроводности.

Для проведения теплового моделирования печатного узла с помощью инструментов SolidWorks Simulation требуется задать граничные условия. При задании в программе процессов излучения и естественной конвекции от всех поверхностей вводилась температура окружающего воздуха $53,2 \text{ }^\circ\text{C}$, исходя из проведенных в подсистеме АСОНИКА-Т расчетов для блока дальномера. Справочный коэффициент конвективной теплоотдачи был взят $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Коэффициент черноты поверхностей ЭРЭ и платы — $0,8$. Для областей крепежных отверстий задана температура термооснования $55 \text{ }^\circ\text{C}$. В зависимости от способа крепления тепловые сопротивления крепления ЭРЭ заданы от $0,8$ до $2,5 \text{ К}/\text{Вт}$. Для каждого ЭРЭ и области металлизации был задан источник теплового потока (в Вт), взятый из результатов схмотехнического моделирования. Из-за высокой удельной электропроводности меди тепловой режим одиночного проводника определяется не только общим температурным фоном печатной платы, но и действием выделяемого в проводнике джоулева тепла, которое целесообразно учитывать [18].

В основу решения задач теплопроводности в программе SolidWorks заложен метод конечных элементов [19]: непрерывная в объеме тела физическая величина, в данном случае температура, может быть аппроксимирована дискретной моделью, построенной на множестве кусочно-непрерывных функций. Для этого изучаемая модель разбивается на множество малых областей, называемых конечными элементами, соединенными между собой в узлах. В нашем случае печатный узел — объемное тело, поэтому модель состоит из тетраэдров, по площадям граней которых распределение температуры аппроксимируется параболическими или линейными функциями.

В связи с высокой сложностью и неоднородностью построенной геометрической модели печатного узла для исследования была выбрана сетка на основе смешанной кривизны (рис. 5).



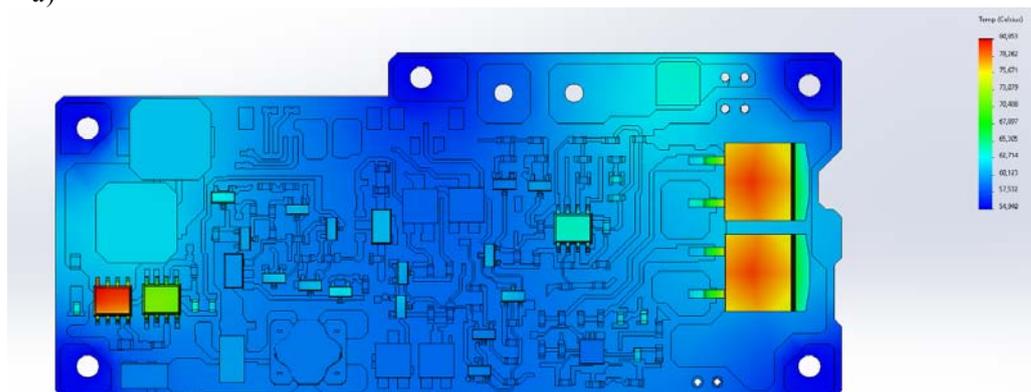
Рис. 5

Проведено компьютерное моделирование печатного узла для температуры реального эксперимента ($25 \text{ }^\circ\text{C}$). Напомним, что используется наиболее приближенная к реальности

модель с учетом топологии проводников на верхней и нижней сторонах и эффективным коэффициентом теплопроводности (пример расчета которого приведен выше).

Результаты моделирования печатного узла в САПР SolidWorks приведены на рис. 6 (а — тепловое поле верхней стороны, с учетом проводников; б — нижней). Наиболее сильно нагреты элементы VT19, VT20, VT11. С использованием функции „зондирование“ в САПР были получены следующие значения: $T_{VT19} = 79,7$, $T_{VT20} = 79,5$, $T_{VT11} = 78,4$ °С. Важно заметить, что ножки элементов VT19 и VT20 нагреваются не в равной степени вследствие того, что опираются на полигоны металлизации, различающиеся по площади. Температура различных участков платы составляет в среднем 55 °С при температуре окружающего воздуха 25 °С.

а)



б)

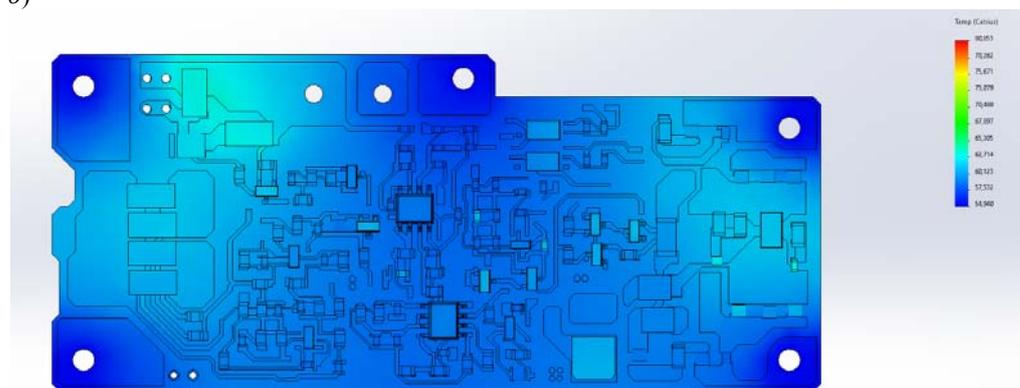


Рис. 6

В боковых областях проводящих слоев расположены крупные полигоны, которые разогреваются из-за проходящего по ним тока. В то же время эти фрагменты металлизации выполняют роль теплоотвода для размещенных на них ЭРЭ и отводят тепловой поток эффективнее, чем дорожки в средней части платы.

Далее было проведено моделирование печатного узла с использованием второй модели (рис. 7, верхняя сторона) без учета топологии печатных проводников сверху и снизу, но с заданием эффективного коэффициента теплопроводности, рассчитанного для всех слоев по формуле

$$\lambda_3 = 0,2 + 0,6 \left((6 \cdot 0,05) / (5 \cdot 0,34) \right) \cdot 390 = 41,5 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Температура на корпусе $T_{VT19} = 83,8$, $T_{VT20} = 84,2$, $T_{VT11} = 85,0$ °С.

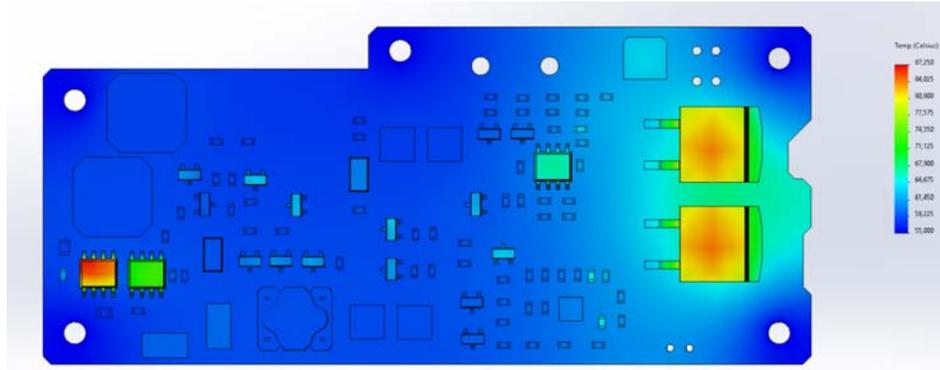


Рис. 7

В третьем варианте моделирования исследована та же модель, но задан коэффициент теплопроводности только для стеклотекстолита FR-4 $\lambda_{\text{штп}} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Температура на корпусе $T_{\text{VT19}} = 92,0$, $T_{\text{VT20}} = 92,3$, $T_{\text{VT11}} = 89,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Во второй части исследований для расчета коэффициентов тепловой нагрузки [12] было проведено моделирование при максимально допустимой рабочей температуре окружающей среды $55 \text{ }^\circ\text{C}$ (такая температура эксплуатации лазерного дальномера определяется его техническими условиями). В этом случае для модели с полным учетом металлизации значения температуры были наименьшими: $T_{\text{VT19}} = 81,6$, $T_{\text{VT20}} = 81,6$, $T_{\text{VT11}} = 80,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

При использовании модели с учетом только эффективной теплопроводности платы и без металлизации сверху и снизу температура составила: $T_{\text{VT19}} = 86,2$, $T_{\text{VT20}} = 86,5$, $T_{\text{VT11}} = 87 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура на рассматриваемых элементах в модели без учета металлизации: $T_{\text{VT19}} = 95,7$, $T_{\text{VT20}} = 96,0$, $T_{\text{VT11}} = 92,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Экспериментальная часть. Для сравнения результатов моделирования и реальных значений был проведен эксперимент с лабораторным образцом дальномера. До крепления датчиков с помощью тепловизора было получено тепловое поле платы генератора импульсов тока при подаче питания (рис. 8).

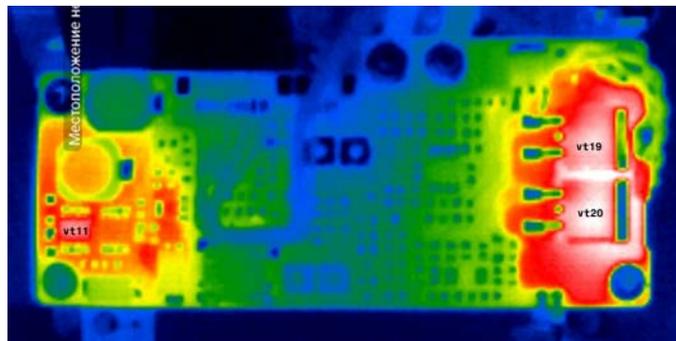


Рис. 8

Распределение температуры подтвердило, что ЭРЭ VT19, VT20, VT11 являются наиболее тепловыделяющими. На рис. 9 приведена плата с уже установленными тремя термодатчиками DS18B20.

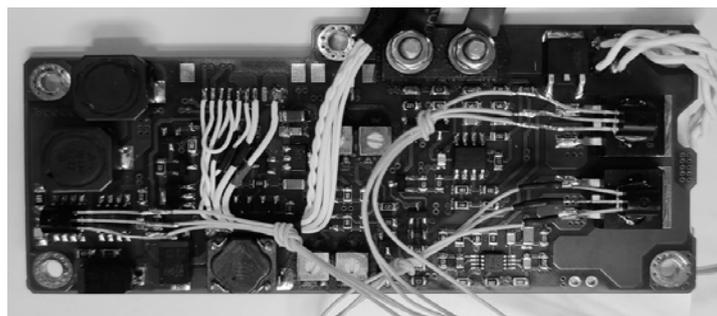


Рис. 9

Затем плата была установлена в корпусе, который, в свою очередь, крепился на термооснование с поддерживаемой температурой 55 °С. Дальномер был выдержан на термоосновании в течение 2 ч для стабилизации начальной температуры. Температура окружающей среды на момент проведения эксперимента равнялась 25 °С. Начальная температура запуска на датчиках 52 °С. Заданная длительность работы дальномера 10 мин. Результаты эксперимента представлены на рис. 10. На датчиках установились: $T_{VT19} = 76,1$ (датчик 1), $T_{VT20} = 75,5$ (датчик 2), $T_{VT11} = 77,7$ °С (датчик 3).

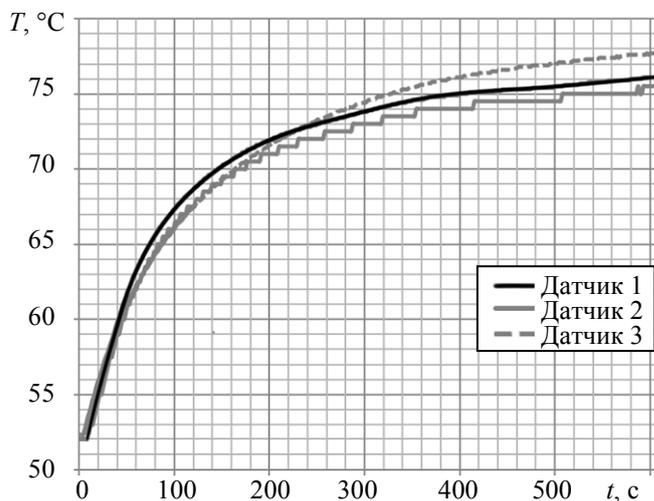


Рис. 10

Результаты проведенных исследований. Проанализировав результаты моделирования с учетом и без учета металлизации, можно увидеть, что температура на ЭРЭ существенно различается. Примем значения температуры, полученные в эксперименте, за истинные. Результаты расчетов относительных погрешностей для результатов моделирования при температуре окружающей среды 25 °С представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение результатов, полученных для моделей с различными вариантами учета металлизации

ЭРЭ	$T_{\text{эсп}}, ^\circ\text{C}$	С полным учетом металлизации		С учетом только эффективной теплопроводности платы		Без учета металлизации	
		$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, \%$	$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, \%$	$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, \%$
VT19	76,1	79,7	5	83,8	10	92,0	21
VT20	75,5	79,5	5	84,2	12	92,3	22
VT11	77,7	78,4	1	85,0	9	89,2	15

Таким образом, полученные при использовании модели платы с учетом печатных проводников результаты близки к экспериментальным, погрешность моделирования ниже погрешности эксперимента, по сравнению с моделью без учета — не выше 5 %. Исходя из этого можно прийти к заключению, что разработанная модель с учетом печатных проводников адекватна. Это означает, что для лабораторных испытаний в реальных условиях проектирования РЭП изготавливать их макеты не нужно, заменив испытания компьютерным моделированием. Это сокращает затраты на проектирование.

Также были рассчитаны коэффициенты тепловой нагрузки [12] для ЭРЭ, подверженных наиболее существенному нагреву и рассматриваемых ранее (табл. 2). Коэффициент тепловой нагрузки равен отношению температуры ЭРЭ, полученной при моделировании (задается вариант эксплуатации в среде с максимальной рабочей температурой 55 °С), к максимально допустимой по техническим условиям ($T_{VT19 \text{ тУ}} = T_{VT20 \text{ тУ}} = 175$, $T_{VT11 \text{ тУ}} = 150$ °С).

Таблица 2

Коэффициенты тепловой нагрузки для моделей различной детализации

Модель	$K_{VT19} = \frac{T_{VT19}}{T_{VT19\text{ ТУ}}}$	$K_{VT20} = \frac{T_{VT20}}{T_{VT20\text{ ТУ}}}$	$K_{VT11} = \frac{T_{VT11}}{T_{VT11\text{ ТУ}}}$
С полным учетом металлизации	0,47	0,47	0,53
С учетом только эффективной теплопроводности платы	0,49	0,49	0,58
Без учета металлизации	0,55	0,55	0,62

Из табл. 2 видно, что нормальный тепловой режим соблюдается с необходимым запасом по температуре (обычно 20—40 % от предельно допустимой) для трех рассматриваемых вариантов тепловых моделей. Однако применение в процессе моделирования тепловой модели с полным учетом металлизации позволяет получить реальный тепловой режим платы генерации импульсов тока точнее, поскольку присутствует учет дополнительного отвода тепла от печатного узла с ЭРЭ через участки с металлизацией.

Заключение. В настоящей работе показано, что для исследования тепловых режимов РЭП целесообразно на первых стадиях проектирования проводить не одноэтапное компьютерное тепловое моделирование печатных узлов с помощью известного САПР SolidWorks, а двухэтапное — с помощью двух программных продуктов. Такой подход позволяет более точно учитывать температуру воздуха, окружающего печатные узлы, и тепловые условия эксплуатации, задавая граничные условия для моделирования печатного узла, приближенные к реальности.

Для сопоставления точности моделирования значений температуры в печатном узле были исследованы три тепловые модели. В самой полной из них учитывается топология верхней и нижней сторон, а также наличие в плате проводящих медных слоев. Во второй отсутствуют печатные проводники, но принимается во внимание их вклад в процессы теплообмена путем учета эффективного коэффициента теплопроводности платы. В третьей отсутствует какой-либо учет наличия печатных проводников. Моделирование тепловых режимов для печатного узла показало, что погрешность реального эксперимента для подробной модели не превышала 5 %, а для модели без учета металлизации — 22 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что тепловые модели, не учитывающие металлизации, впоследствии оказываются заметно менее точными, особенно в случаях, когда слои проводников состоят из печатных полигонов большой площади. Опыт этого исследования показывает, что только в редких случаях, при разработке аппаратуры повышенной надежности, оправданно проведение сверхточного моделирования с использованием подробных геометрических моделей. Использование моделей средней сложности, не усложняющих расчетную сетку, но обеспечивающих нахождение реального эффективного коэффициента теплопроводности платы, целесообразно при выполнении большинства проектов. Такие модели дают погрешность в среднем 10—12 %, что является допустимым при моделировании тепловых режимов электроники.

Несмотря на то что в трех вариантах тепловых моделей одного печатного узла коэффициенты тепловой нагрузки не превышают рекомендуемого для бортовой аппаратуры значения 0,7, и разница в определении коэффициентов для полной модели и модели без учета печатных проводников составила до 8—9 %, это достаточно много, когда расчетные коэффициенты могут получиться близкими к рекомендованной верхней границе или немного выше ее. В этом случае также применение модели с учетом эффективного коэффициента теплопроводности позволяет получить коэффициент тепловой нагрузки с меньшей погрешностью (2—5 %), по сравнению с использованием полной модели.

Убедительно показано, что необходимо оценивать и учитывать влияние металлизации, которая выступает в роли системы охлаждения, на тепловые процессы печатных узлов.

Результаты настоящего исследования могут быть учтены для установления более точной и убедительной корреляции между конкретными схемами трассировки и тепловыделениями на ЭРЭ в различных классах РЭП, для которых очень важны и точность, и надежность работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В. Ф., Пискун Г. А., Лихачевский Д. В.* Моделирование тепловых полей электронных систем в среде ANSYS // Big Data and Advanced Analytics. 2020. № 6-3. С. 282—286.
2. *Ellison G. N.* Thermal computations for electronics conductive, radiative, and convective air cooling. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, 2011.
3. *Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е.* Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. радио, 1976. 232 с.
4. *Боровиков С. М., Цырельчук И. Н., Троян Ф. Д.* Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств: учеб.-метод. пособие. Минск: БГУИР, 2010. 68 с.
5. *Raja V., Praveenkumar V., Leelaprasad M., Manigandan P.* Thermal simulations of an electronic system using Ansys Icepak // Intern. Journal of Engineering Research and Applications. 2015. Vol. 5, is. 11. P. 57—68.
6. *Evstatieva N., Evstatiev B.* Modelling the Temperature Conditions of a Printed Circuit Board // 12th Intern. Symp. on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). 2021. P. 1—4. DOI: 10.1109/ATEE52255.2021.9425281.
7. *Москаленко К. И.* Моделирование тепловых режимов элементов на печатной плате средствами САПР // Молодежн. науч.-техн. вестн. 2016. № 5. С. 31—38.
8. *Карабан В. М., Суслов И. О.* Возможности проведения расчета теплового режима печатных плат в системе имитационного моделирования Ansys Icepak // Решетневские чтения. 2012. № 16. С. 179—180.
9. *Рыбаков И. М.* Алгоритм исследования теплового режима печатной платы // Тр. междунар. симп. „Надежность и качество“. 2017. Т. 1. С. 362—364.
10. *Рыбаков И. М.* Методика применения печатных проводников в качестве системы охлаждения // Тр. междунар. симп. „Надежность и качество“. 2018. С. 48—51.
11. *Карабан В. М., Сухоруков М. П., Морозов Е. А.* Математические модели многослойных печатных плат для теплового моделирования электронных устройств и систем // Доклады ТУСУР. 2013. № 3(29). С. 170—174.
12. *Kofanov Y., Kuznetsov N., Sotnikova S.* Evidence-Based Modeling of Thermal Processes in Printed Circuit Assemblies of Optoelectronic Devices // Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). IEEE, 2021. P. 1—4. DOI: 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642785.
13. *Дульнев Г. Н.* Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высш. шк., 1984. 247 с.
14. *Kuznetsov E., Golyaev Y., Kolbas Y., Kofanov Y., Kuznetsov N., Vinokurov Y., Soloveva T.* Thermal computer modeling of laser gyros at the design stage: a promising way to improve their quality and increase the economic efficiency of their development and production // Optical and Quantum Electronics Switzerland: Springer, 2021. Vol. 53, is. 10. Art. number 596. P. 1—15. DOI: 10.1007/s11082-021-03253-8.
15. *Гольдин В. В., Журавский В. Г., Коваленок В. И.* и др. Исследование тепловых характеристик РЭС методами математического моделирования. М.: Радио и связь, 2003. 456 с.
16. *Семененко А. Н., Кофанов Ю. Н., Роткевич А. С., Увайсов С. У.* Тепловая модель радиаторов модулей электропитания электронных средств // Качество. Инновации. Образование. 2015. № 12(127). С. 44—52.
17. *Захарьин К. Н., Сарафанов А. В., Егоров Н. М., Трегубов С. И.* Компьютерные технологии в приборостроении. Основы математического и методического обеспечения. Версия 1.0. Красноярск: ИПК СФУ, 2008.
18. *Rybakov I. M., Goryachev N. V., Kochegarov I. I., Grishko A. K., Brostilov S. A., Yurkov N. K.* Application of the model of the printed circuit board concerning the topology of external conductive layers for calculation of the thermal conditions of the printed circuit board // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 803, N 1. P. 1—6. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012130.
19. *Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В.* Применение ЭВМ для решения задач теплообмена: учеб. пособие для теплофизич. и теплоэнергетич. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1990. 207 с.

- Сведения об авторах**
- Светлана Юрьевна Сотникова** — канд. техн. наук; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова, департамент электронной инженерии; E-mail: ssonnikova@hse.ru
- Наталья Алексеевна Кононова** — студентка; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова, департамент электронной инженерии; E-mail: nakononova_1@miem.hse.ru
- Леонид Борисович Ландер** — студент; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова, департамент электронной инженерии; E-mail: lblander@miem.hse.ru
- Вячеслав Эдуардович Цветков** — студент; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова, департамент электронной инженерии; E-mail: vetsvetkov@miem.hse.ru
- Степан Владимирович Яловнаров** — студент; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова, департамент электронной инженерии; E-mail: svyalovnarov@edu.hse.ru

Поступила в редакцию 01.07.2022; одобрена после рецензирования 24.07.2022; принята к публикации 31.08.2022.

REFERENCES

1. Alekseev V.F., Piskun G.A., Likhachevsky D.V. *Big Data and Advanced Analytics*, 2020, no. 6-3, pp. 282–286. (in Russ.)
2. Ellison G.N. *Thermal computations for electronics conductive, radiative, and convective air cooling*, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, 2011.
3. Rotkop L.L., Spokoyny Yu.E. *Obespecheniye teplovykh rezhimov pri konstruirovaniy radioelektronnoy apparatury* (Providing Thermal Conditions in the Design of Radio-Electronic Equipment), Moscow, 1976, 232 p. (in Russ.)
4. Borovikov S.M., Tsyrelchuk I.N., Troyan F.D. *Raschet pokazateley nadezhnosti radioelektronnykh sredstv* (Calculation of Indicators of Reliability of Radio Electronic Means), Minsk, 2010, 68 p. (in Russ.)
5. Raja B., Praveenkumar V., Leelaprasad M., Manigandan P. *Intern. Journal of Engineering Research and Applications*, 2015, no. 11(5), pp. 57–68.
6. Evstatieva N., Evstatiev B. *12th Intern. Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2021, pp. 1–4, DOI: 10.1109/ATEE52255.2021.9425281.
7. Moskalenko K.I. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik* (Youth Scientific and Technical Bulletin), 2016, no. 5, pp. 31–38. (in Russ.)
8. Karaban V.M., Suslov I.O. *Reshetnevskiy chteniye*, 2012, no. 16, pp. 179–180. (in Russ.)
9. Rybakov I.M. *Transactions of the International Symposium on Reliability and Quality*, Penza, 2017, vol. 1, pp. 362–364. (in Russ.)
10. Rybakov I.M. *Transactions of the International Symposium on Reliability and Quality*, Penza, 2018, pp. 48–51. (in Russ.)
11. Karaban V.M., Sukhorukov M.P., Morozov E.A. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2013, no. 3(29), pp. 170–174. (in Russ.)
12. Kofanov Y., Kuznetsov N., Sotnikova S. *Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, IEEE, 2021, pp. 1–4, DOI: 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642785.
13. Dulnev G.N. *Teplo- i massoobmen v radioelektronnoy apparature* (Heat and Mass Transfer in Electronic Equipment), Moscow, 1984, 247 p. (in Russ.)
14. Kuznetsov E., Golyaev Y., Kolbas Y., Kofanov Y., Vinokurov Y., Soloveva T. *Optical and Quantum Electronics*, Springer, Switzerland, 2021, no. 10(53), art. number 596, pp. 1–15, DOI: 10.1007/s11082-021-03253-8.
15. Goldin V.V., Zhuravsky V.G., Kovalenok V.I. et al. *Issledovaniye teplovykh kharakteristik RES metodami matematicheskogo modelirovaniya* (Research of Thermal Characteristics of RES by Methods of Mathematical Modeling), Moscow, 2003, 456 p. (in Russ.)
16. Semenenko A.N., Kofanov Yu.N., Rotkevich A.S., Uvaisov S.U. *Quality. Innovation. Education*, 2015, no. 12(127), pp. 44–52. (in Russ.)
17. Zakharyin K.N., Sarafanov A.V., Egorov N.M., Tregubov S.I. *Komp'yuternyye tekhnologii v priborostroyenii. Osnovy matematicheskogo i metodicheskogo obespecheniya. Versiya 1.0* (Computer Technologies in Instrument Making. Fundamentals of Mathematical and Methodological Support. Version 1.0), Krasnoyarsk, 2008. (in Russ.)
18. Rybakov I.M., Goryachev N.V., Kochegarov I.I., Grishko A.K., Brostilov S.A., Yurkov N.K. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, no. 1(803), pp. 1–6, DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012130.

19. Dulnev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. *Primeneniye EVM dlya resheniya zadach teploobmena* (The Use of Computers for Solving Heat Transfer Problems), Moscow, 1990, 207 p. (in Russ.)

Data on authors

- Svetlana Yu. Sotnikova** — PhD; HSE University, Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, School of Electronic Engineering; E-mail: ssootnikova@hse.ru
- Natalia A. Kononova** — Student; HSE University, Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, School of Electronic Engineering; E-mail: nakononova_1@miem.hse.ru
- Leonid B. Lander** — Student; HSE University, Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, School of Electronic Engineering; E-mail: lblander@miem.hse.ru
- Vyacheslav E. Tsvetkov** — Student; HSE University, Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, School of Electronic Engineering; E-mail: vetsvetkov@miem.hse.ru
- Stepan V. Yalovnarov** — Student; HSE University, Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, School of Electronic Engineering; E-mail: svyalovnarov@edu.hse.ru

Received 01.07.2022; approved after reviewing 24.07.2022; accepted for publication 31.08.2022.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

УДК: 004.358
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-725-734

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ ГИБРИДНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ ПО СБОРКЕ СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

В. П. Кузьменко*, С. В. Солёный

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

**mr.konnny@gmail.com*

Аннотация. Приведен пример выбора аппаратной и программной части оборудования для создания цифрового двойника гибридной автоматизированной сборочной линии. Описаны необходимые функции цифрового двойника гибридной сборочной линии светодиодных осветительных приборов, проанализированы функции моделей программных менеджеров системы (Менеджер ресурсов, Менеджер датчиков, Менеджер компоновки среды). Приведено UML-представление модели данных цифрового двойника.

Ключевые слова: гибридная сборочная линия, сборка светодиодных осветительных приборов, цифровой двойник производственной линии

Ссылка для цитирования: Кузьменко В. П., Солёный С. В. Разработка модели цифрового двойника для гибридной производственной линии по сборке светодиодных осветительных приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 10. С. 725—734. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-725-734.

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN MODEL FOR A HYBRID PRODUCTION LINE FOR LED LIGHTING DEVICES ASSEMBLY

V. P. Kuzmenko*, S. V. Solenyi

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia
mr.konnny@gmail.com*

Abstract. An example of the choice of hardware and software parts of equipment for creating a digital twin of a hybrid automated assembly line is presented. The necessary functions of the digital twin of the hybrid assembly line of LED lighting devices are described, the functions of the models of the software components of the system managers (Resource Manager, Sensor Manager, Environment Layout Manager) are analyzed. The UML representation of the digital twin data model is given.

Keywords: hybrid production line, assembly of LED lighting devices, digital twin production line

For citation: Kuzmenko V. P., Solenyi S. V. Development of a digital twin model for a hybrid production line for LED lighting devices assembly. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 10. P. 725—734 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-725-734.

Введение. Тенденции к персонализации выпуска серийных изделий определяют предпосылки развертывания гибких и реконфигурируемых сборочных линий и производственных систем, в результате чего появляются новые гибридные сборочные линии, которые позволяют использовать возможности как оператора (человека), так и роботов-помощников.

На глобализированном рынке отчетливо заметно стремление к более высокому уровню персонализации производимых продуктов и изделий, так называемой „кастомизации“. Однако в современных производственных системах переход к массовому „кастомизированию“ продукции порождает высокие затраты на проектирование и производство. Возможность предлагать больше вариантов для серийных моделей и быстрее внедрять новые модели ограничена современными технологиями и оборудованием для массового производства [1, 2].

Достижение гибкости и адаптивности, которые можно определить как чувствительность производственной системы к внутренним и внешним процессам, рассматривается в качестве одного из наиболее перспективных решений [3]. Однако в современных производственных системах, основанных на автоматизации технологических процессов, гибкость и возможность реконфигурации по-прежнему ограничены из-за ряда факторов [4—6]:

- жесткость используемых стационарных роботизированных линий;
- использование стационарного и специализированного оборудования для различных серий продуктов;
- использование фиксированной логики управления линий.

Мобильность, как в ресурсах, так и на уровне продукта, может сыграть существенную экономическую роль в реализации таких производственных концепций.

В последние десятилетия проведены обширные исследования в области мобильных роботизированных систем и манипуляторов. Однако возможности ставших уже традиционными промышленных решений по автоматизации не позволяют в режиме реального времени адаптировать систему и функционирование линии к динамически протекающим процессам.

Функционал большинства манипуляторов ограничен выполнением автономных запрограммированных задач, только когда они находятся в фиксированном положении — это не позволяет в полной мере использовать мобильность таких роботизированных систем.

Поэтому разрабатываются частичные решения, обеспечивающие оптимизацию производительности производственной системы за счет моделирования процессов. Развитие технологий цифрового и информационного моделирования с использованием машинного обучения привело к появлению концепции цифровых двойников (ЦД).

Однако существующие производственные инфраструктуры недостаточно развиты, чтобы поддерживать интеграцию обсуждаемой концепции гибридного производства. Использование операторов, а также различных автоматизированных устройств, таких как несколько мобильных „двуруких рабочих“ и продуктов, значительно увеличивает сложность системы. Чтобы преодолеть существующие ограничения, необходимо разработать такую инфраструктуру цифрового двойника, которая будет способна поддерживать обработку данных с разных ресурсов, а также изменение ситуации в цехе в режиме реального времени.

Предлагаемая концепция разработки и использования цифрового двойника для создания гибридной производственной линии разрабатывается с целью применения при сборке светодиодных осветительных приборов. Тем не менее, решение должно разрабатываться с учетом возможности тиражирования концепции на другие отрасли производства.

Постановка задачи. Практическая реализация описанных возможностей сопровождается внедрением технологии цифрового двойника производственной или сборочной линии, обеспечивающего взаимодействие физического оборудования и цифровых процессов. Задачи разработки цифрового двойника сборочной линии для обеспечения возможности реконфигурации системы посредством комплексного представления среды и рабочих процессов требуют:

- 1) виртуального представления сборочной линии (или целого цеха), которое обеспечит объединение данных, получаемых с датчиков, и существующих данных цифровой модели цеха;
- 2) семантического представления цеха посредством реализации единой модели данных для геометрического представления, а также состояния рабочей загруженности линии;

3) динамического обновления цифрового двойника на основе данных датчиков и ресурсов, в режиме реального времени поступающих из физического пространства.

Для того чтобы организовать качественный уровень интеграции между физическими и виртуальными процессами и устройствами, необходимо соответствующее программное решение; им может выступить свободно распространяемое программное обеспечение с открытым кодом — „операционная система для роботов“ (Robot Operating System, ROS).

ROS — это набор программных библиотек и инструментов, помогающих создавать приложения или целую операционную систему для управления роботизированными средствами драйверов. С постоянно обновляющимися современными инструментами разработчика в ROS есть все, что нужно для обеспечения взаимодействия аппаратной и цифровой частей робототехнического проекта [6—8]. ROS предлагает широкий набор форматов данных для виртуального представления различных аппаратных устройств с различными типами датчиков, а также имеет сеть сервисов для передачи собранных данных.

В разрабатываемой модели ROS может выполнять функции приложения для динамического управления роботом, основанным на цифровом моделировании и получении данных с датчиков с целью обеспечения траекторий движения манипулятора без столкновений.

Концепция гибридной сборочной линии с применением технологии ЦД предусматривает использование мобильных роботизированных платформ и манипуляторов, которые могут автономно перемещаться по цеху, выполняя множество сборочных операций (таких как погрузка, сортировка, монтаж простых элементов и т.д.), действуя в качестве помощников для операторов.

Концепция разрабатываемой модели ЦД представлена на рис. 1.

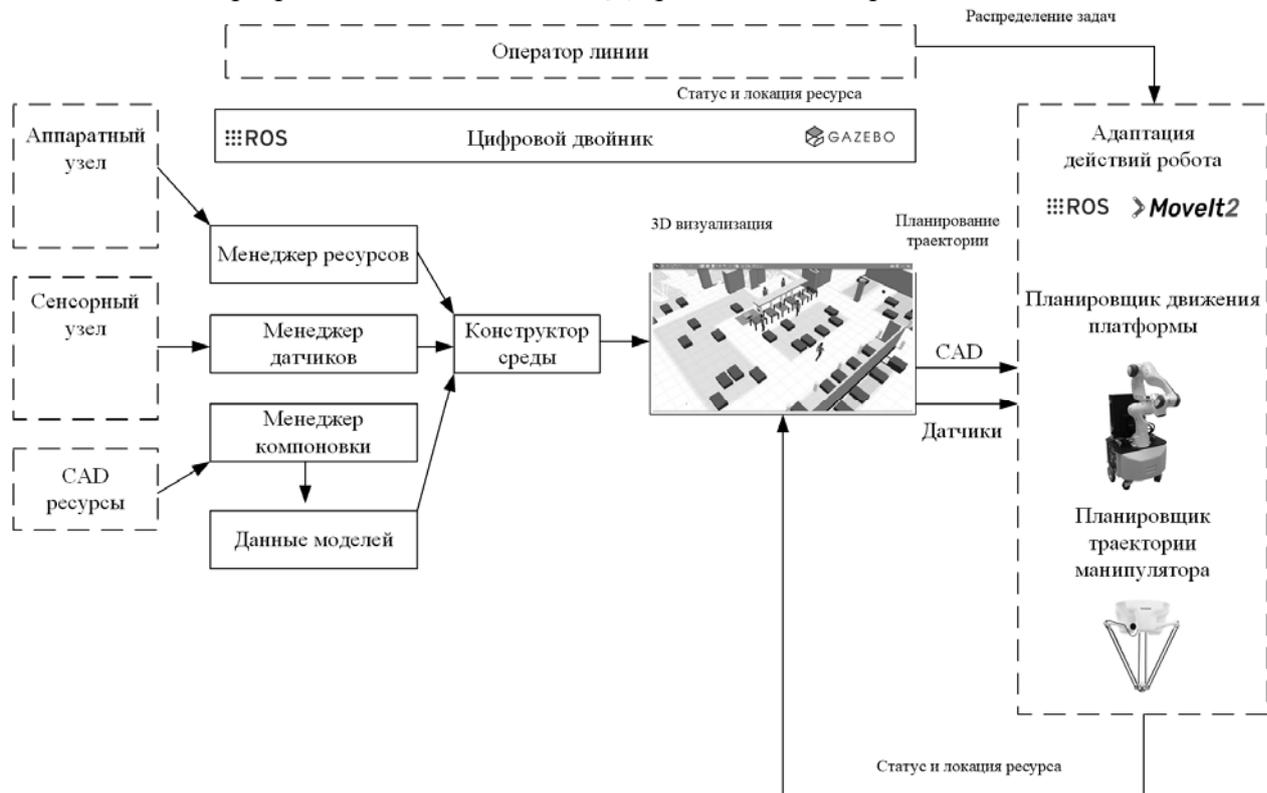


Рис. 1

Для решения этой задачи необходимо разработать модель цифрового двойника, способную в режиме реального времени виртуально представлять состояние цеха, обеспечивая следующие функциональные возможности:

— упрощенная интеграция управления и обмен данными датчиков через сервисы. Это приводит к более легкому распределению полученных данных и задач через НМИ по всем

соответствующим ресурсам, таким как мобильные роботы и т.д. Интеграция осуществляется поверх ROS, задающей оболочки для всех задействованных компонентов;

— виртуальное представление цеха с использованием информации, связанной с ресурсами (Менеджер ресурсов), комбинации данных нескольких датчиков (Менеджер датчиков) и моделей САПР (Менеджер компоновки). Информация постоянно обновляется через сеть сервисов всеми ресурсами и датчиками, синтезируя все данные для обеспечения воспроизведения линии;

— единая семантическая модель данных для представления как геометрического пространства, так и состояния рабочей нагрузки. Эта модель данных должна быть достаточно общей, чтобы иметь возможность обращаться к нескольким ресурсам, а также использоваться несколькими компонентами внутри системы для принятия решений и реагирования в реальном времени.

Предлагаемое решение. Поведение робота адаптируется в режиме реального времени за счет интеграции стандартных планировщиков движения робота-манипулятора и планировщиков навигации на мобильной платформе, которые подключаются к цифровому двойнику для анализа условий в цехе и создания безопасных и свободных от коллизий траекторий во время выполнения различных производственных задач [8, 9].

В разрабатываемой концепции модели для инфраструктуры ЦД должны быть развернуты четыре программных компонента: Менеджер ресурсов; Менеджер датчиков; Менеджер компоновки; Конструктор 3D-среды.

Эти программные компоненты разрабатываются на основе ПО ROS, они обеспечивают связь между узлами сети и интеграцию с другими встроенными роботизированными приложениями. Описанную инфраструктуру ЦД возможно развернуть на различных операционных системах, как свободно распространяемых типа Ubuntu или Linux, так и на Windows или macOS, с установленной на них версией ROS 2 Foxy Fitzroy или ROS 2 Galactic.

Каждый из описанных программных компонентов желательно реализовать как узел C++, которым будет предоставлен интерфейс ROS (темы, службы, действия) для обмена соответствующей информацией.

В таблице приведены расширения файлов конфигурации, которые обрабатываются и генерируются с помощью ЦД и являются совместимыми с ROS.

Формат файла	Описание
.yaml	Синтаксис YAML, используемый для запроса и установки параметров с сервера параметров ROS. XML-файл, используется для запуска узлов ROS
.urdf	Стандартный формат для описания моделей роботов и датчиков
.sdf	Формат файла для описания объектов и окружения симуляторов роботов, таких как Gazebo ignition
.srdf	Формат файла, используемый с целью семантического описания в Moveit2 для конфигурации Планировщика движения робота

Компонент Менеджер ресурсов отвечает за регистрацию в ЦД любого нового ресурса, представленного в цехе. На основе унифицированной модели данных ресурсов Менеджер ресурсов хранит все атрибуты, составляющие модель ресурсов, такие как максимальная полезная нагрузка, минимальная скорость, местоположение, конфигурация преобразования (.urdf), конфигурация пути (.yaml) и движения (.srdf) и т.д.

Два подкомпонента отвечают за мониторинг состояния и местоположения каждого мобильного ресурса в режиме реального времени и обновление в онлайн-режиме фактических значений в модели ЦД.

На рис. 2—4 представлены модели программных компонентов: Менеджера ресурсов (рис. 2), Менеджера датчиков (рис. 3), Конструктора 3D-среды (рис. 4).

Как показано на рис. 2, для каждого ресурса, транслирующего свои данные в режиме реального времени, инициируются конкретные темы и службы ROS.

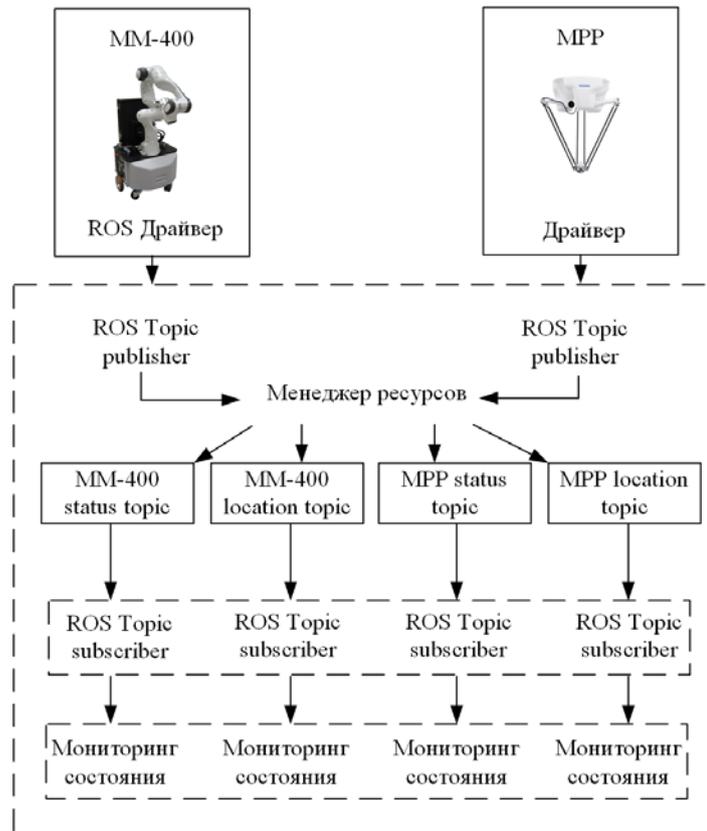


Рис. 2

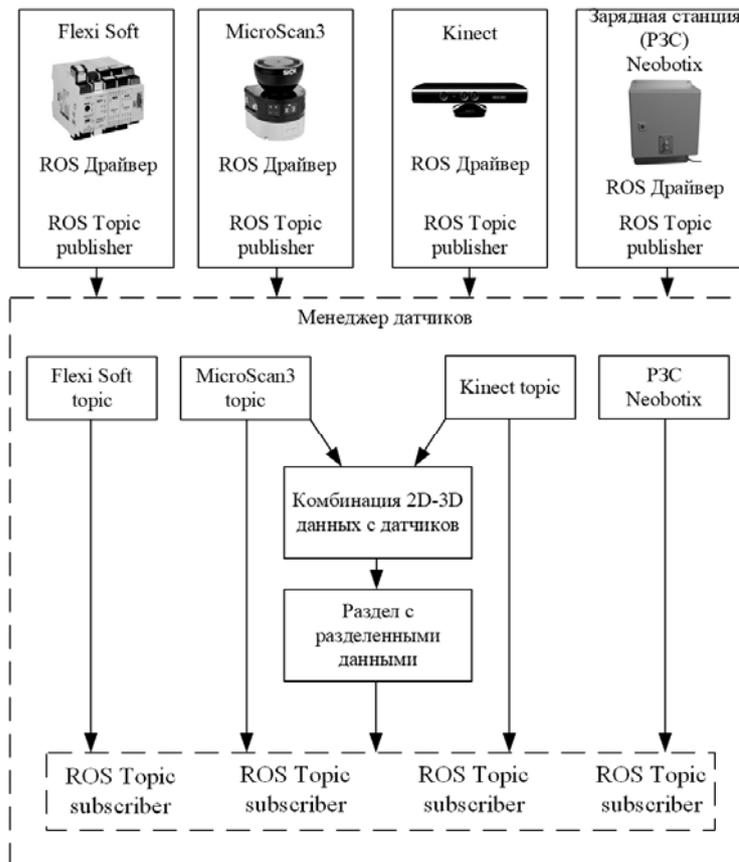


Рис. 3

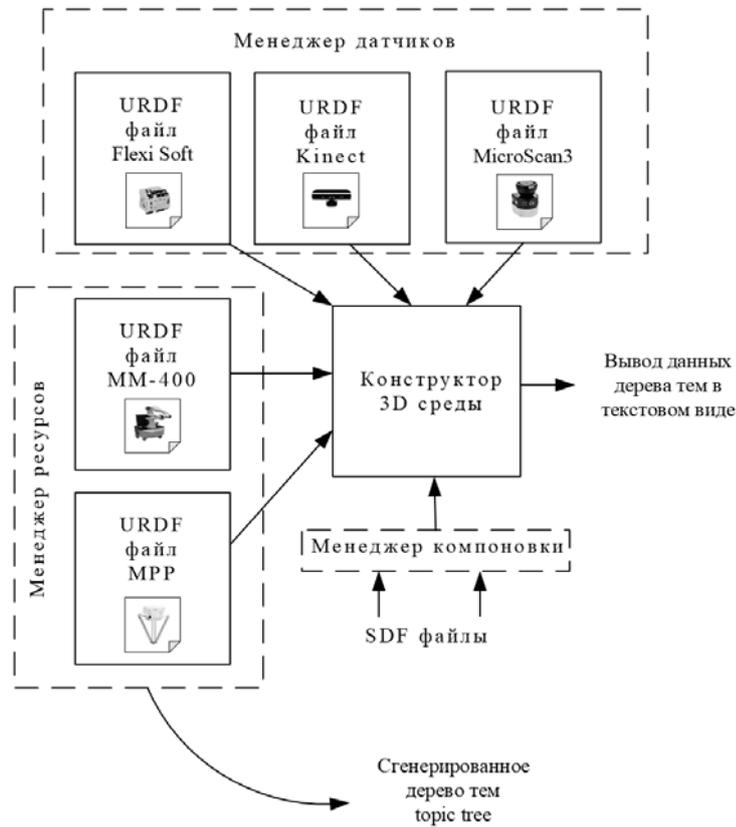


Рис. 4

Компонент Менеджер датчиков отвечает за взаимодействие датчиков с драйверами ROS и регистрацию их конфигурационных данных в хранилище ЦД с использованием унифицированного формата модели данных.

Все сенсорные данные становятся доступными для планировщиков роботов, если используются шаблоны topic/subscriber в качестве механизмов связи. Датчики однозначно определяются по их идентификаторам, сохраняя список соответствующих тем. Для облегчения использования стандартных алгоритмов планирования движения и траектории (например, gmapping, amcl, ompl) модуль комбинирования данных датчиков передает информацию Конструктору 2D—3D-среды, что позволяет динамически объединять информацию нескольких датчиков [10—12].

Для описания логики работы модели ЦД целесообразно разработать UML-диаграмму проекта, по которой в дальнейшем можно разработать программный код. UML-модели с помощью графических правил и синтаксиса позволяют визуализировать процесс функционирования системы, объединить все компоненты в единую структуру и вносить правки в процессе работы. В ходе разработки UML-модели возможно собрать как крупные, так и более мелкие детали системы и разработать каркас (схему) приложения. Предложенная диаграмма UML-модели цифрового двойника гибридной производственной сборочной линии светодиодных осветительных приборов представлена на рис. 5.

В рамках разработки модели ЦД необходимо предусмотреть также компонент Планировщик пути, содержащий алгоритм предотвращения столкновений между подвижными ресурсами гибридной сборочной линии и не нанесенными на карту препятствиями внутри цеховой среды. На данный момент существует достаточное количество алгоритмов с планировщиками траекторий для обеспечения онлайн-перепланирования на основе объединенной информации в режиме реального времени [13—15].

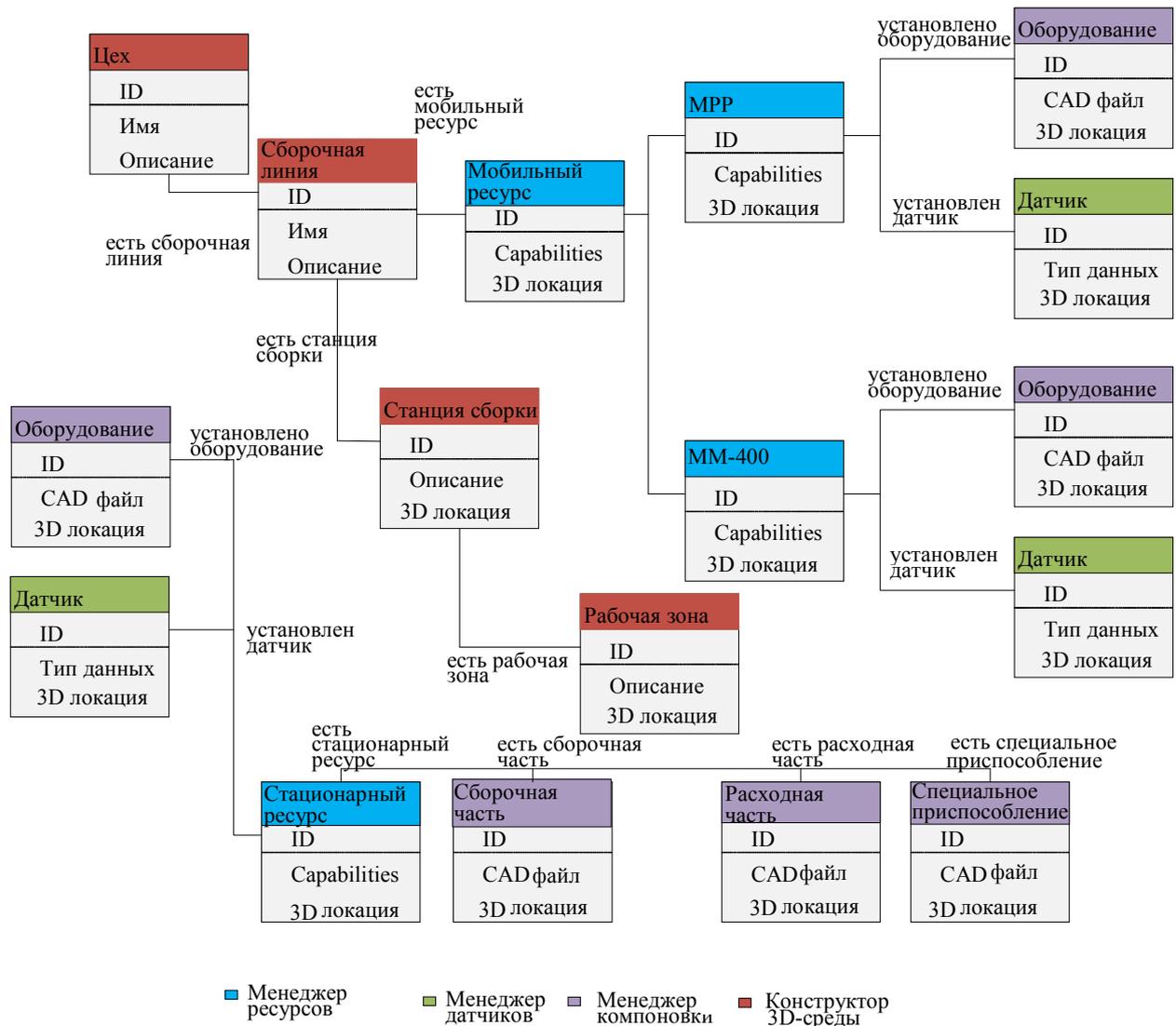


Рис. 5

Пример генерации плана траектории и плана движения на основе предоставляемых данных цифрового двойника с описанным оборудованием представлен на рис. 6.



Рис. 6

Интерфейс компонента Планировщик пути может быть основан на навигационном стеке ROS для мобильных роботов. Тогда в ЦД должны обеспечиваться:

- а) преобразование для каждой системы координат робота (система координат описывается в файле .urdf);
- б) получение сигналов и одометрической информации с датчиков расстояния, необходимых для отображения и локализации ресурса и для обхода препятствий;
- в) преобразование глобальной карты цеха (3D-карта) — этот компонент можно реализовать в сетке занятости с использованием библиотеки OctoMap и информации о препятствиях.

Предлагаемая модель ЦД производственной линии встраиваемых светодиодных осветительных приборов предполагает автоматизацию выполнения простых функций по сборке светодиодного светильника — установки рассеивателя, сортировки и складирования светильников и пр.

Разработанная концепция гибридной производственной линии основана на анализе, проведенном в [7], она предполагает использование как минимум одного робота типа MM-400, одного робота типа MPP, а также оператора.

Для эффективного выполнения сценария MM-400 должен воспринимать:

а) местоположение демпфера и движущегося приспособления в режиме реального времени, чтобы компенсировать ошибки локализации, которые невозможно предвидеть в автономном режиме, используя данные стереокамер `rs_visard`,

б) статические препятствия, движущихся людей,

в) данные, полученные с лазерного сканера.

Взаимодействие с оператором планируется осуществлять через устройство и библиотеку Kinect.

При выполнении описанных условий смоделированная инфраструктура ЦД может быть развернута с целью интеграции и обновления виртуального мира в режиме реального времени с помощью информации, поступающей от датчиков, искусственных препятствий для задания траектории и модулей обнаружения людей, то есть ЦД должен транслировать обработанную информацию роботам, для планирования траектории движения.

Для тестирования разработанной модели может быть настроен сценарий в движке физического моделирования, с этой целью могут быть использованы средства программного обеспечения с открытым кодом GAZEBO, которые являются свободно распространяемыми, или средства Unity Digital Twins, Unity Digital Planning (или аналогичные им).

Для корректной работы системы необходимо использование:

а) файлов САПР абстрактного цеха для представления макета;

б) виртуальных контроллеров ROS универсальных роботов;

в) данных двумерного лазерного сканера для создания 2D-карты;

г) данных имитированной стереокамеры для обнаружения виртуальных объектов;

д) реальных данных Kinect с целью сопоставления с физическими данными для тестирования взаимодействия человека и робота с помощью распознавания жестов.

Заключение. В работе представлена модель системы цифрового двойника, обеспечивающая инфраструктуру для интеграции всех аппаратных компонентов, необходимых при синтезе всех поступающих данных ЦД в единой общей цифровой среде. Для получения информации о цехе и сборочной линии каждый ресурс применяет методы познания.

Полученная модель, согласно описанной концепции технического решения, разрабатывалась для исследования гибридной сборочной линии светодиодных осветительных приборов.

Исходя из принципов унификации модели было предусмотрено, чтобы цифровой двойник позволял поддерживать множество случаев взаимодействия, включая мобильные и/или стационарные роботы, однорукие и/или многорукие манипуляторы, несколько типов датчиков (2D, 3D, F/T и т.д.) и операторов (людей). Внедрение цифрового двойника позволяет производственной системе компенсировать реальную неопределенность окружающей среды, а также непредсказуемость поведения человека. Таким образом, отпадает необходимость в автономном программировании и проверке движений робота, когда требуется внести изменения в технологический процесс, что сводит к минимуму необходимые время и усилия. Однако такая система демонстрирует более высокую сложность из-за увеличенного объема собираемых и обрабатываемых данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mittal S., Khan M. A., Romero D., Wuest T.* Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2019. Vol. 233, N 5. P. 1342—1361.
2. *Царев М. В., Андреев Ю. С.* Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 7. С. 517—531.
3. *Krüger J., Wang L., Verl A., Bauernhansl T., Carpanzano E., Makris S., Fleischer J., Reinhart G., Franke J., Pellegrinelli S.* Innovative control of assembly systems and lines // CIRP Annals of Manufacturing Technology. 2018. Vol. 66. P. 707—730.
4. *Боровков А. И., Рябов Ю. А.* Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // Цифровая трансформация экономики и промышленности: Сб. тр. науч.-практ. конф. с зарубежным участием. 20—22 июня 2019 г. СПб: Политех-Пресс, 2019. С. 234—245. DOI:10.18720/IEP/2019.3/25.
5. Дорожная карта развития „сквозной“ цифровой технологии „Новые производственные технологии“ [Электронный ресурс]: <<https://digital.gov.ru/ru/documents/6662>>. (06.06.2022)
6. *Garfinkel J.* Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2019 // Gartner Tech. Rep. 2018 [Электронный ресурс]: <<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-10-15-gartner-identifies-the-top-10-strategic-technology-trends-for-2019>>.
7. Операционная система робота [Электронный ресурс]: <<http://www.ros.org>>.
8. *Kousi N., Michalos G., Aivaliots S., Makris S.* Overview of Future Assembly Systems Introducing Two-Armed Robotic Mobile Workers // 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS 2018). Stockholm, Sweden, 16—18 May 2018.
9. *Huang S., Wang G., Yan Y., Fang X.* Blockchain-based data management for digital twin of product // Journal of Manufacturing Systems. 2020. Vol. 54. January. P. 361—371. DOI:10.1016/j.jmsy.2020.01.009.
10. *Афанасьев М. Я., Федосов Ю. В., Крылова А. А., Шорохов С. А.* Применение машинного зрения в задачах автоматического позиционирования инструмента модульного оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 9. С. 830—839.
11. *Qi Q., Tao F., Hu T., Anwer N., Liu A., Wei Y., Wang L., Nee A.* Enabling technologies and tools for digital twin // Journal of Manufacturing Systems. 2021. Vol. 58, Pt. B. January. P. 3—21. DOI:10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
12. *Schluse M., Priggemeyer M., Atorf L., Rossmann J.* Experimentable digital twins—Streamlining simulation-based systems engineering for Industry 4.0 // IEEE Trans. Ind. Information. 2018. Vol. 14, N 4. P. 1722—1731. DOI:10.1109/TII.2018.2804917.
13. *Dasbach T., Zancul E., Schützer K., Anderl R.* Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era // PLM 2019. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Cham, Springer, 2019. Vol. 565. P. 283—292. DOI:10.1007/978-3-030-42250-9_27.
14. *Захаров В. В., Ушаков В. А.* Динамический подход к планированию модернизации автоматизированных систем управления производственными объектами // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 6. С. 585—588.
15. *Mrugalska B., Zasada B., Wyrwicka M. K.* Preventive Approach to Machinery and Equipment Maintenance in Manufacturing Companies // Advances in manufacturing, Production Management and Process Control. 2019. Vol. 793. P. 540—548.

Сведения об авторах**Владимир Павлович Кузьменко**

— канд. техн. наук; СПбГУАП, кафедра электромеханики и робототехники; старший преподаватель; E-mail: mr.konnny@gmail.com

Сергей Валентинович Солёный

— канд. техн. наук, доцент; СПбГУАП, кафедра электромеханики и робототехники; заведующий кафедрой; E-mail: ssv555sv@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.06.2022; одобрена после рецензирования 14.07.2022; принята к публикации 31.08.2022.

REFERENCES

1. Mittal S., Khan M.A., Romero D., Wuest T. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2019, no. 5(233), pp. 1342–1361.
2. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 7(64), pp. 517–531, DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531. (in Russ.)
3. Kruger J., Wang L., Werl A., Bauernhansl T., Carpanzano E., Makris S., Fleischer J., Reinhart G., Franke J., Pellegrinelli S. *CIRP Annals of Manufacturing Technology*, 2018, vol. 66, pp. 707–730.
4. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. *Tsifrovaya transformatsiya ekonomiki i promyshlennosti* (Digital Transformation of the Economy and Industry), Proceedings of a scientific and practical conference with foreign participation, June 20–22, 2019, St. Petersburg, 2019, pp. 234–245, DOI:10.18720/IEP/2019.3/25. (in Russ.)
5. <https://digital.gov.ru/ru/documents/6662>. (in Russ.)
6. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-10-15-gartner-identifies-the-top-10-strategic-technology-trends-for-2019>.
7. <http://www.ros.org>. (in Russ.)
8. Kousi N., Michalos G., Aivaliots S., Makris S. *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS 2018)*, Stockholm, Sweden, May 16–18, 2018.
9. Sihan H., Guoxin W., Yan Y., Xiongbing F. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, vol. 54, pp. 361–371, DOI:10.1016/j.jmsy.2020.01.009.
10. Afanasiev M.Ya., Fedosov Yu.V., Krylova A.A., Shorokhov S.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 9(63), pp. 830–839, DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-9-830-839. (in Russ.)
11. Qi Q., Tao F., Hu T., Anwer N., Liu A., Wei Y., Wang L., Nee A. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, vol. 58, pt. B, January, pp. 3–21, DOI:10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
12. Schluse M., Priggemeyer M., Atorf L., Rossmann J. *IEEE Trans. Ind. Information*, 2018, no. 4(14), pp. 1722–1731, DOI:10.1109/TII.2018.2804917.
13. Dasbach T., Zancul E., Schützer K., Anderl R. *PLM 2019. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Cham, Springer, 2019, vol. 565, pp. 283–292, DOI:10.1007/978-3-030-42250-9_27.
14. Zakharov V.V., Ushakov V.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 6(62), pp. 585–588, DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-6-585-588. (in Russ.)
15. Mrugalska B., Zasada B., Wyrwicka M.K. *Advances in manufacturing, Production Management and Process Control*, 2019, vol. 793, pp. 540–548.

Data on authors

- Vladimir P. Kuzmenko** — PhD; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Electromechanics and Robotics; Senior Lecturer; E-mail: mr.konnny@gmail.com
- Sergey V. Solenyi** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Electromechanics and Robotics; Head of the Department; E-mail: ssv555ssv@yandex.ru

Received 30.06.2022; approved after reviewing 14.07.2022; accepted for publication 31.08.2022.

**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ,
ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

**INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING THE NATURAL
ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS**

УДК 620.179.17
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-735-746

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧИМОСТИ
СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ,
ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ВТОРИЧНЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Е. АЛТАЙ*, А. В. ФЕДОРОВ, К. А. СТЕПАНОВА, Д. О. КУЗИВАНОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
*
aeldos@inbox.ru

Аннотация. Статистическая оценка вторичных диагностических показателей акустической эмиссии (АЭ) является неотъемлемой частью процесса обработки сигнала после применения методов фильтрации. Представлены результаты анализа параметров АЭ с использованием метода полиномиальной цифровой двунаправленной фильтрации помехи АЭ, полученной при АЭ-контроле двух инструментов в процессе фрезерования. Проанализирована работоспособность данного метода фильтрации при определении различия между исходными и отфильтрованными сигналами АЭ. Выделены фрагменты информационной и помеховой составляющих сигнала, что позволило экспериментально определить показатель сигнал/помеха. Установлено, что использование полиномиального цифрового метода двунаправленной фильтрации повышает качество обработки сигнала и позволяет обнаружить статистически значимые корреляционные связи между параметрами АЭ-сигналов при контроле дефектного и бездефектного инструмента. Линейной регрессионной моделью охарактеризована зависимость, описывающая отношение вторичных диагностических показателей дефектного инструмента к показателям бездефектного инструмента при АЭ-контроле.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, обработка сигнала, фильтрация помехи, параметры акустической эмиссии, диагностические показатели, статистическая обработка, отношение сигнал/помеха

Ссылка для цитирования: Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А., Кузиванов Д. О. Экспериментальное определение значимости статистической оценки параметров, характеризующих вторичные диагностические показатели акустической эмиссии // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 10. С. 735—746. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-735-746.

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE SIGNIFICANCE OF STATISTICAL EVALUATION
OF PARAMETERS CHARACTERIZING SECONDARY DIAGNOSTIC INDICATORS
OF ACOUSTIC EMISSION**

Y. Altay*, A. V. Fedorov, K. A. Stepanova, D. O. Kuzivanov

ITMO University, St. Petersburg, Russia
*
aeldos@inbox.ru

Abstract. Statistical evaluation of secondary diagnostic indicators of acoustic emission (AE) is an integral part of signal processing after applying filtering methods. AE parameters of acoustic noise obtained while monitoring AE from two tools in the milling process are analyzed using the method of polynomial digital bidirectional filtering. The efficiency of this filtering method is examined by determining the difference between the original and filtered AE signals. Fragments of the information and noise components of the signal are separated to allow for experimental determination of the signal/interference indicator. It is shown that the use of the polynomial digital method of bidirectional filtering improves the

© Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А., Кузиванов Д. О., 2022

quality of signal processing and makes it possible to detect statistically significant correlations between the parameters of AE signals when testing a defective and defect-free instruments. A linear regression model is applied to describe the ratio of secondary diagnostic indicators of a defective instrument to indicators of a defect-free tool during AE monitoring.

Keywords: acoustic emission, signal processing, noise filtering, acoustic emission parameters, diagnostic indicators, statistical processing, signal-to-noise ratio

For citation: Altay Y., Fedorov A. V., Stepanova K. A., Kuzivanov D. O. Experimental determination of the significance of statistical evaluation of parameters characterizing secondary diagnostic indicators of acoustic emission. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 10. P. 735—746 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-735-746.

Введение. Статистическая оценка параметров сигнала акустической эмиссии (АЭ) на сегодняшний день является одним из важнейших этапов при анализе данных измерений после применения методов первичной обработки сигнала, а именно его фильтрации [1—4]. Это обусловлено тем, что составляющая помехи АЭ-сигнала снижает точность оценки первичных и вторичных диагностических показателей, характеризующих совокупность признаков, с помощью которых можно определить состояние объекта контроля (ОК). Повышение точности оценки показателей и, следовательно достоверность АЭ-диагностики ОК, главным образом зависит от эффективности применяемых методов первичной обработки сигнала (фильтрации) [5]. Недостаточное ослабление помеховой составляющей сигнала существенно снижает точность оценки показателей АЭ [1—4, 6, 7], поэтому применение методов фильтрации значительно для вторичной обработки сигналов при оценке диагностических показателей АЭ.

В настоящей статье, в отличие от работ [5, 8—10], при экспериментальной апробации разработанного цифрового фильтра [8, 10], вырабатывающего оценку по критериям максимума отношения сигнал/помеха и минимума среднеквадратичного отклонения сигнала, представлены результаты первичной обработки зашумленных натуральных сигналов и статистическая оценка специфических параметров АЭ. Для фильтра в [8, 10] предложено использовать понятие „фильтр вырабатывает“, согласно введенной в монографии Б.Р. Левина [11] и общепринятой терминологии. В настоящей статье понятие „фильтр вырабатывает“ используется для определения возможности фильтра в обработке сигналов АЭ.

Цель исследований — повышение результативности обработки сигналов АЭ за счет цифровой полиномиальной фильтрации для оценки статистической различимости зашумленных и отфильтрованных сигналов и вычисления вторичных диагностических показателей АЭ и их значимости.

Исходные данные. В исследовании использованы сигналы, зарегистрированные в процессе фрезерования пластины из алюминиевого сплава двумя инструментальными твердосплавными фрезами. При этом одна из фрез была бездефектной, а у другой был дефект в виде скола резьбы на конце рабочей части инструмента.

В ходе эксперимента, который проводился в Университете ИТМО, были записаны и оцифрованы результаты регистрации 48 сигналов (из них 24 для бездефектной фрезы и 24 — для фрезы с дефектом) с помощью сертифицированной измерительной АЭ-системы США. Все сигналы содержали не менее 4000 отсчетов (q) измерений при частоте дискретизации 4 МГц и регистрировались в единых условиях в отсутствие внешних факторов среды, влияющих на результаты эксперимента. Полученные результаты регистрации обработаны с применением разработанной системы обработки сигнала АЭ на основе схемы двунаправленной фильтрации для выделения как информационной составляющей сигналов (s), так и (n) помехи [8, 10].

Обработка результатов регистрации сигналов акустической эмиссии. При проведении экспериментальных исследований обработка результатов регистрации проводилась в два этапа. На первом этапе с помощью дискретного преобразования Фурье получена эмпирическая оценка частоты зарегистрированных сигналов для обоснования частоты среза настраиваемого

фильтра. На втором этапе в программном пакете MatLab выполнена первичная обработка сигнала и вычислены параметры АЭ для дальнейшей статистической обработки.

На рис. 1 представлены результаты спектрального анализа зашумленного сигнала АЭ при контроле бездефектного (а) и дефектного (б) инструмента.

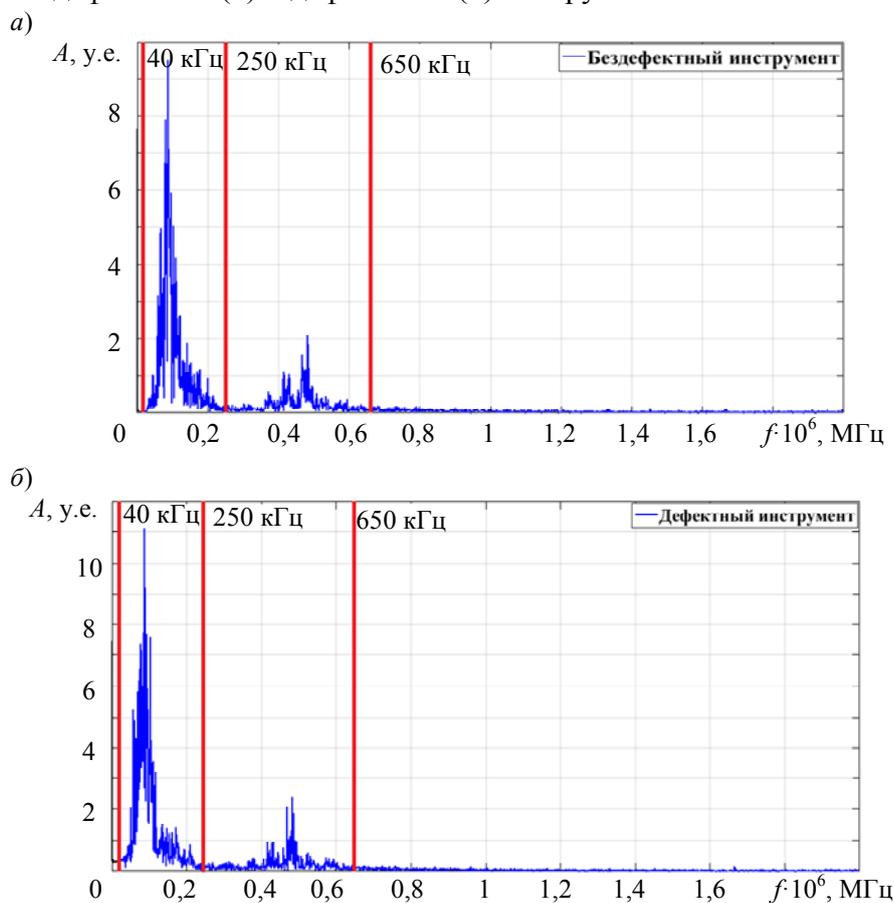


Рис. 1

Анализ спектров показал, что амплитуда сигнала при контроле дефектного инструмента превышает амплитуду сигнала при контроле бездефектного примерно на 1,5 у. е., а амплитуда помеховой составляющей сигнала, расположенной выше спектра информационного сигнала, имеет незначительную вариабельность в зависимости от частоты.

Результаты первого этапа обработки результатов показали, что частота натуральных зашумленных сигналов для бездефектного и дефектного инструмента идентифицировалась в диапазоне 40—650 кГц. При этом информационная составляющая расположена в интервале от 40 до 250 кГц, а помеховая — от 250 до 650 кГц. Полученные оценки совпадают с имеющимся экспериментальными данными [12], где отмечено, что сигналы АЭ, полученные во время фрезерования, могут находиться в диапазоне частот от 40 до 350 кГц [12]. Это позволяет обосновать выбор верхней границы (а именно 250 кГц) частотного диапазона информационной составляющей сигнала АЭ для настройки фильтра верхних частот (ФВЧ) [8] с целью ослабления влияния помехи.

Для обработки результатов регистрации сигнала АЭ характеристики цифрового фильтра проанализированы при помощи амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и нуль-полусной диаграммы (НПД) [8]. Результат АЧХ фильтра показал, что ФВЧ на частоте среза 250 кГц без пульсаций, монотонный и стабильный, как в полосе пропускания сигнала, так и в полосе подавления помехи, а корни структуры передаточной функции фильтра расположены внутри окружности единичного радиуса на НПД и устойчивы. Все проанализированные

характеристики спроектированного фильтра дают значимое преимущество для выделения не только информационной, но и помеховой составляющей.

Результаты второго этапа обработки результатов показали, что метод фильтрации на основе двунаправленного ФВЧ, настроенный на частоту среза 250 кГц, позволяет выделить как информационную составляющую сигналов АЭ, так и помеховую. Для лучшей визуализации и сравнения результатов регистрации на рис. 2—4 выделенные сигналы информационной и помеховой составляющих бездефектного (а) и дефектного (б) инструмента представлены по одному образцу.

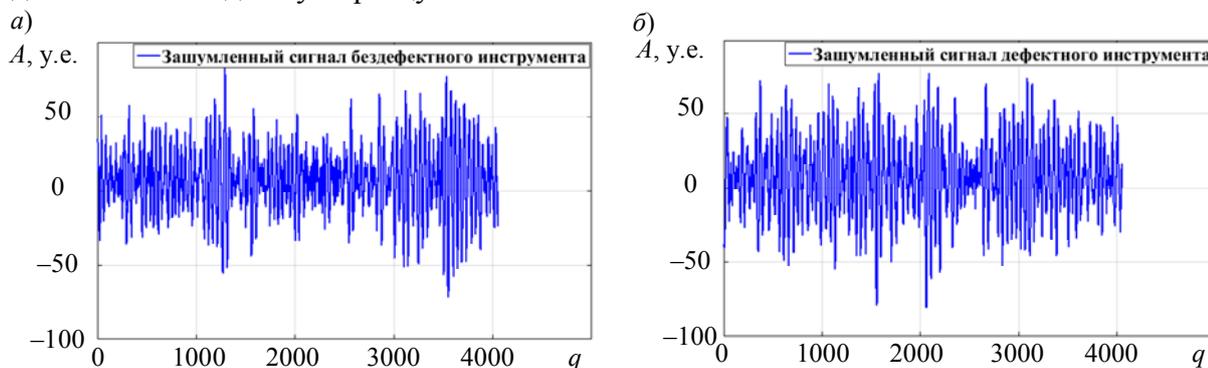


Рис. 2

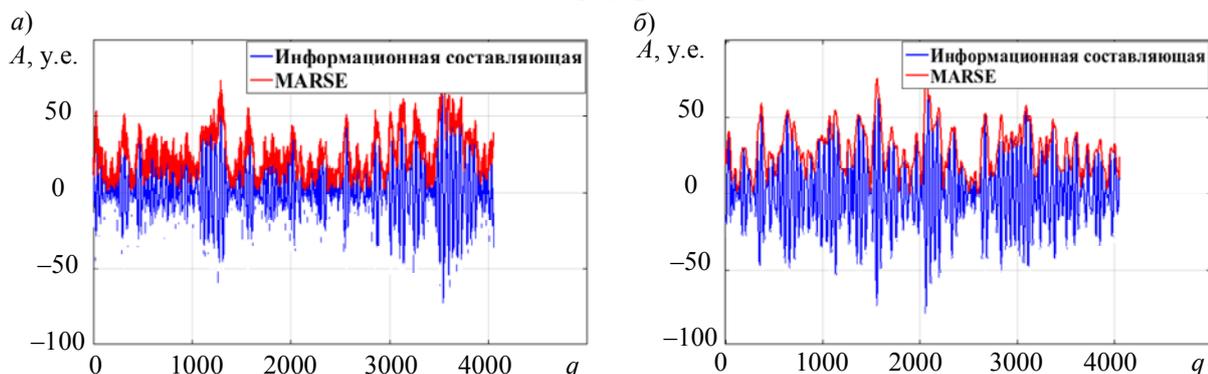


Рис. 3

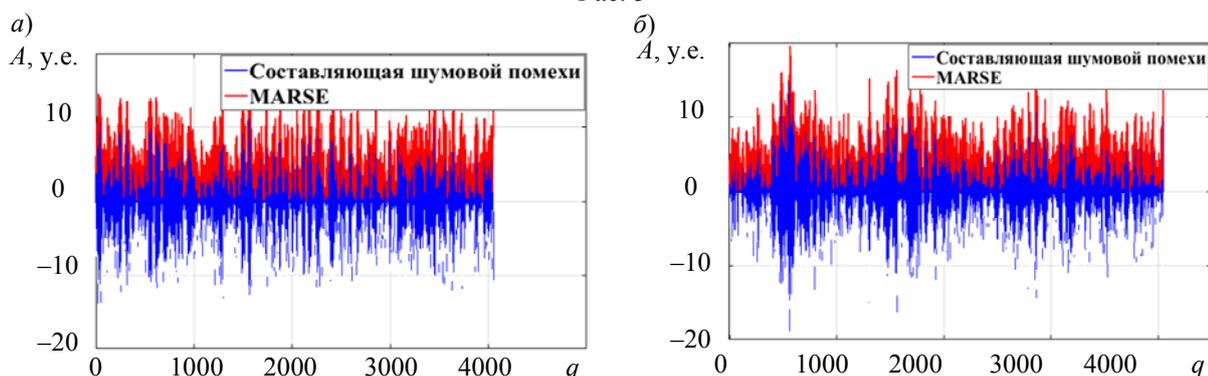


Рис. 4

Сравнительный анализ форм сигналов, представленных на рис. 2—4, показал, что формы сигналов АЭ дефектного и бездефектного инструмента различаются. Информационная составляющая бездефектного инструмента АЭ (рис. 3, а) заметно отличается от информационной составляющей дефектного инструмента (рис. 3, б), а форма сигнала подобна явлению АЭ при сравнении с зашумленным сигналом (рис. 2), где информационная составляющая замаскирована помеховой (рис. 4). Различимость зашумленных и отфильтрованных сигналов, полученных при контроле дефектного и бездефектного инструмента, была проанализирована при помощи метода статистического анализа.

Статистический анализ результатов регистрации и обработки. Для описания результатов измерения и их обработки использовался двойной дескриптивный анализ [13]. Этот подход позволяет охарактеризовать весь набор измеряемых данных и выбрать метод статистики для оценки различимости отсчетов между зашумленными и отфильтрованными сигналами при отличии данных измерения от гауссова закона распределения. Зашумленные и отфильтрованные отсчеты сигналов представлены в виде среднего арифметического значения (u), стандартных отклонений (σ), медианы (Me) и квартилей ($Q1—Q3$). Оценка распределения отсчетов сигналов проводилась на основе расчета критерия Лиллиефорса, используемого для измерений более чем $q>50$.

Дескриптивный анализ показал различие в значениях u и Me в отсчетах исходных и отфильтрованных сигналов как для бездефектного, так и для дефектного инструмента. Значения квартилей $Q1—Q3$ медианы характеризуют существенный разброс в зашумленном наборе, по сравнению с тем же набором в отфильтрованных сигналах. Наличие такого разброса $Q1—Q3$ в квартилях $x_i(q)$ и $s_i(q)$ относительно их медианы следует характеризовать влиянием помеховой составляющей. Различие в значениях показателей u и Me говорит об отличии данных от гауссова закона распределения, так как $u \neq Me$, о чем и свидетельствует p -уровень значимости (p -значение) критерия Лиллиефорса (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Статистические характеристики анализируемых сигналов АЭ для бездефектного инструмента

№	Показатели зашумленных сигналов АЭ, $x_i(q)$			Показатели информационной составляющей сигналов АЭ, $s_i(q)$			
	$u \pm \sigma$, мВ ($q>4000$)	Me [Q1; Q3], мВ ($q>4000$)	p^*	$u \pm \sigma$, мВ ($q>4000$)	Me [Q1; Q3], мВ ($q>4000$)	p^{**}	
1	7,688±22,195	8,000 [-6,000; 22,000]	0,01	0,132±19,746	0,225 [-12,359; 12,298]	0,01	
2	0,386±30,383	0,000 [-13,000; 14,000]		0,019±24,248	0,319 [-10,137; 10,869]		
3	6,612±27,199	6,000 [-5,000; 18,000]		0,142±20,787	0,086 [-8,329; 8,583]		
4	2,789±24,016	2,000 [-8,000; 15,000]		0,115±17,429	0,216 [-7,824; 8,170]		
5	7,700±19,366	7,000 [-5,000; 21,000]		0,171±16,967	0,190 [-11,380; 11,607]		
6	0,379±83,416	0,000 [-29,000; 31,000]		0,050±63,290	0,150 [-22,233; 23,306]		0,006
7	6,637±61,915	6,000 [-22,000; 34,000]		0,088±44,326	0,287 [-21,730; 21,563]		0,01
8	2,750±66,162	4,000 [-27,000; 31,000]		0,039±45,297	1,092 [-21,281; 19,982]		
9	7,109±45,929	3,000 [-65,000; 71,000]		0,282±41,616	0,838 [-28,184; 27,916]		0,003
10	0,243±170,953	2,000 [-68,000; 71,000]		0,01	0,019±121,385		0,236 [-50,087; 50,220]
11	6,583±141,891	7,000 [-44,000; 57,000]	0,029±87,488		0,018 [-33,948; 34,541]		
12	2,645±166,862	3,000 [-65,000; 71,000]	0,084±105,629		0,369 [-45,225; 44,769]		
13	7,002±61,192	7,000 [-32,000; 45,000]	0,612±56,145		0,420 [-36,050; 34,376]		
14	0,096±303,403	3,000 [-67,000; 66,000]	0,248±194,055		1,827 [-49,695; 47,714]		
15	6,503±246,515	4,000 [-48,000; 63,000]	0,027±160,821		3,109 [-40,571; 43,224]		
16	2,793±253,476	3,000 [-63,000; 68,000]	0,655±174,735		1,019 [-44,728; 46,950]		
17	7,456±101,098	6,000 [-62,000; 77,000]	0,05		0,273±91,886	0,681 [-64,492; 64,131]	0,008
18	0,236±196,168	2,000 [-79,000; 77,000]	0,01	0,628±141,708	0,184 [-58,479; 57,888]	0,01	
19	6,781±126,663	6,000 [-49,000; 61,000]		0,091±92,403	0,515 [-41,952; 42,607]		
20	2,784±174,061	3,000 [-58,000; 61,000]		0,158±114,559	0,297 [-40,512; 41,193]		
21	6,827±88,822	8,000 [-53,000; 66,000]		0,388±81,595	1,126 [-54,714; 54,642]		0,007
22	0,354±164,777	0,000 [-67,000; 69,000]		0,174±126,609	1,152 [-51,558; 52,033]		0,01
23	6,707±131,671	6,000 [-50,000; 63,000]		0,176±91,701	1,174 [-41,878; 40,518]		
24	2,665±123,353	2,000 [-47,000; 51,000]		0,514±86,873	0,938 [-35,783; 34,382]		
p^{***}	<0,05						

Примечание.

p^* — значение критерия Лиллиефорса для зашумленных данных

p^{**} — значение критерия Лиллиефорса для данных на промежутке „до и после обработки“

p^{***} — значение критерия Вилкоксона для данных на промежутке „до и после обработки“

Статистические характеристики анализируемых сигналов АЭ для дефектного инструмента

№	Показатели зашумленных сигналов АЭ, $x_i(q)$			Показатели информационной составляющей сигналов АЭ, $s_i(q)$		
	$u \pm \sigma$, мВ ($q > 4000$)	Me [Q1; Q3], мВ ($q > 4000$)	p^*	$u \pm \sigma$, мВ ($q > 4000$)	Me [Q1; Q3], мВ ($q > 4000$)	p^{**}
1	7,453±25,903	7,000 [-10,000; 25,000]	0,05	0,182±23,142	0,092 [-15,565; 15,8152]	0,003
2	0,301±23,508	0,000 [-7,000; 8,000]	0,01	0,021±16,958	0,072 [-5,226; 5,1795]	0,01
3	6,555±22,363	6,000 [-1,000; 15,000]		0,114±17,265	0,168 [-5,442; 5,9771]	
4	2,746±28,446	3,000 [-9,000; 14,000]		0,109±22,754	0,046 [-9,315; 9,3571]	0,03
5	7,594±22,797	8,000 [-8,000; 23,000]		0,157±20,380	0,295 [-13,037; 13,337]	
6	0,252±52,626	0,000 [-13,000; 13,000]		0,044±27,092	0,038 [-7,973; 7,419]	0,01
7	6,568±40,157	6,000 [-7,000; 19,000]		0,250±22,565	0,298 [-8,702; 9,012]	
8	2,768±57,947	2,000 [-14,000; 19,000]		0,227±39,480	0,082 [-12,304; 11,921]	0,05
9	7,169±52,618	6,000 [-28,000; 43,000]		0,289±47,846	1,343 [-31,774; 31,932]	
10	0,325±230,841	1,000 [-53,000; 50,000]		0,236±185,208	0,282 [-40,511; 42,160]	0,01
11	6,593±319,779	3,000 [-51,000; 56,000]		0,196±270,363	2,135 [-49,789; 42,917]	
12	1,896±435,258	2,000 [-93,000; 100,000]		0,067±369,327	0,858 [-80,774; 82,479]	
13	7,171±53,116	7,000 [-31,000; 44,000]		0,026±48,130	0,649 [-34,573; 33,655]	
14	0,238±213,056	0,000 [-57,000; 61,000]		0,353±135,529	0,499 [-41,455; 41,035]	
15	6,704±205,719	7,000 [-48,000; 59,000]		0,422±142,680	0,362 [-41,742; 39,424]	
16	2,697±267,238	3,000 [-71,000; 76,000]		0,224±192,954	1,127 [-58,596; 58,658]	
17	7,115±74,329	7,000 [-44,000; 59,000]		0,007	0,344±67,582	
18	0,188±198,178	0,000 [-60,000; 64,000]	0,01	0,310±129,497	1,217 [-47,301; 46,188]	0,01
19	6,623±180,076	6,000 [-57,000; 67,000]		0,819±128,028	1,921 [-47,825; 45,633]	
20	2,636±262,964	3,000 [-82,000; 93,000]		0,382±200,546	1,121 [-70,912; 73,355]	
21	6,845±90,523	10,000 [-56,000; 68,000]		0,315±81,506	2,608 [-56,710; 55,919]	
22	0,702±390,122	1,000 [-135,000; 126,000]		0,709±212,159	0,246 [-94,807; 90,669]	
23	5,066±404,508	3,000 [-116,000; 127,000]		0,547±322,293	0,600 [-91,822; 95,613]	
24	1,400±487,264	8,000 [-170,000; 177,000]		0,702±403,611	6,032 [-135,804; 145,132]	
p^{***}	0,05					

Примечание.

p^* — значение критерия Лиллиефорса для зашумленных сигналов

p^{**} — значение критерия Лиллиефорса для информационной составляющей сигналов

p^{***} — значение критерия Вилкоксона для данных на промежутке „до и после обработки“

Соответственно для сопоставления отсчетов зашумленных и отфильтрованных сигналов выбран непараметрический критерий Вилкоксона. При этом, если $p < 0,05$, принимается гипотеза об ослаблении влияния составляющей шумовой помехи на информационный сигнал, а сигналы являются различимыми; если $p > 0,05$, то гипотеза отвергается. Результаты показали, что значение данного критерия меньше порога $< 0,05$, это позволяет утверждать о различиях между отсчетами зашумленных и отфильтрованных сигналов при цифровой фильтрации.

В работе [14] отмечалось, что при проведении диагностического АЭ-исследования ОК основную долю информационного сигнала составляет помеха, энергия которой сопоставима с энергией информационного сигнала или выше ее. Поэтому в настоящей работе энергетическая составляющая, как информационная, так и помеховая, рассматриваемых сигналов оценивается с помощью показателя среднеквадратического значения:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N}(a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_q^2)},$$

где N — число отсчетов сигналов, a — индивидуальные значения отсчета сигнала до q .

Величина этого показателя может интерпретироваться как мгновенная энергия процесса, порождающего анализируемый сигнал АЭ [4, 12]. Вычисленные значения показателя для

информационной составляющей сигнала и шумовой помехи проиллюстрированы на диаграмме Тьюки (рис. 5, а — бездефектный инструмент; б — дефектный).

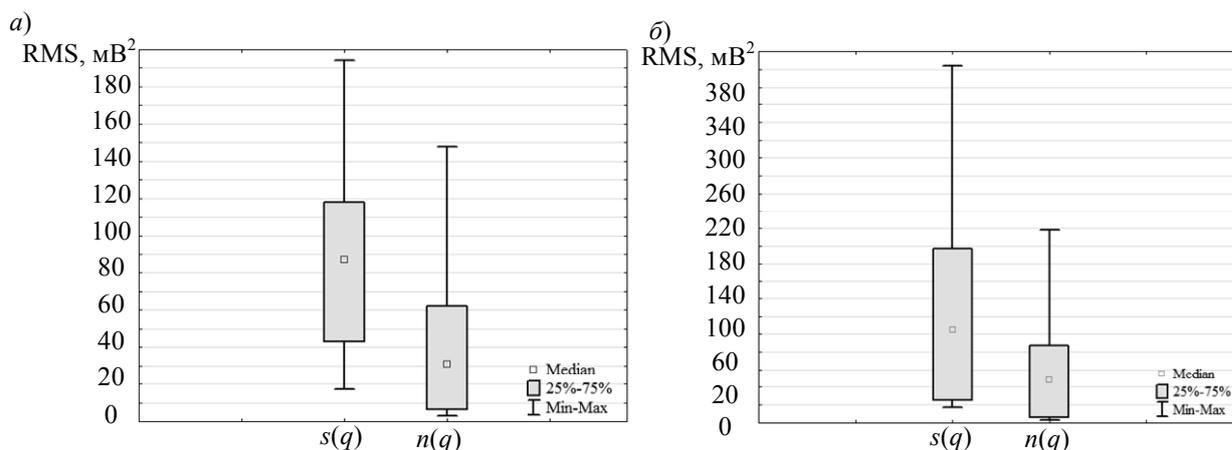


Рис. 5

Сравнивая результаты обработки, представленные на рис. 5, можно заметить, что амплитуда информационной составляющей $s(q)$ в два раза выше амплитуды помеховой составляющей $n(q)$. При контроле бездефектного инструмента значения медиан среднеквадратического значения информационной составляющей: $\text{RMS}_{\text{Me}} = 87,171$; помеховой: $\text{RMS}_{\text{Me}} = 30,776 \text{ мВ}^2$. При контроле дефектного инструмента медиана среднеквадратического значения информационной составляющей: $\text{RMS}_{\text{Me}} = 104,756$; шумовой помехи $\text{RMS}_{\text{Me}} = 48,283 \text{ мВ}^2$. Согласно рис. 5 и представленным значениям медианы, энергия информационной составляющей сигналов в два раза выше энергии шумовой помехи ($\text{RMS}_{s(q)} > \text{RMS}_{n(q)}$). Это также подтверждается рис. 1, амплитуда информационной составляющей сигнала на котором значительно превышает амплитуду помеховой составляющей.

Другим критерием оценки сопоставимости энергии полезного сигнала и помехи является экспериментальный показатель отношения сигнал/помеха (SNR) [4, 8], вычисляемый как отношение среднеквадратического значения сигнала к среднеквадратическому значению амплитуды помехи для рассматриваемых сигналов i на выходе цифрового фильтра [9]:

$$\text{SNR} = 20 \lg \left(\frac{s_i^2(q)}{n_i^2(q)} \right).$$

Вычисленные значения данного показателя для сигналов, полученных при контроле бездефектного и дефектного инструмента, проиллюстрированы в диаграмме Тьюки на рис. 6.

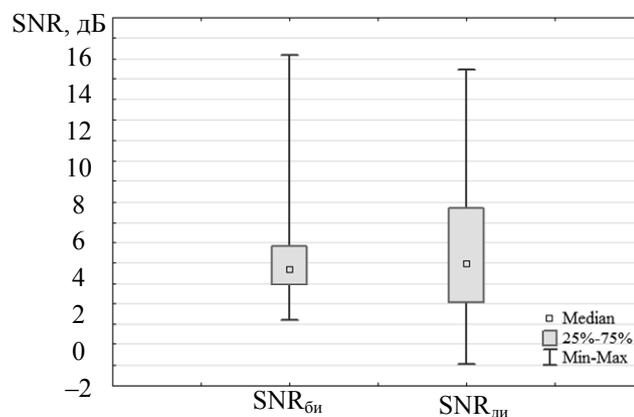


Рис. 6

Из рис. 6 следует, что медиана показателя SNR при контроле бездефектного инструмента составила $SNR_{Me} = 3,661$ дБ, а при контроле дефектного инструмента — $SNR_{Me} = 3,931$ дБ. Значение медианы показателя SNR выше нуля служит информацией о превышении амплитудой информационного сигнала амплитуды помехи. Высокие значения этого показателя характеризуют устойчивость фильтров к влияющей помехе при реализации полиномиального цифрового фильтра [8, 10]. Согласно этой оценке, дальнейший анализ параметров информационной составляющей проводился на основе вычисления вторичных диагностических показателей АЭ [1, 2].

Статистическая оценка параметров акустической эмиссии. При оценке параметров сигналов наилучшую корреляцию со свойствами источника АЭ имеют амплитудные параметры, описывающие энергетическое содержание акустических явлений [1, 2, 15]. В работах [1—4, 15] использовано значительное количество специфичных статистических показателей для оценки параметров АЭ. Для этой оценки часто выбирают такие показатели, как амплитуда сигнала (U), размах сигнала (между значениями максимума и минимума амплитуды, ΔU), среднеквадратическое отклонение (СКО, σ_U), среднеквадратическое значение сигнала (U_{RMS}), энергетический параметр (площадь огибающей сигнала, MARSE). Процедура вычисления перечисленных параметров с целью обнаружения статистически различных, но значимых связей между параметрами дефектного и бездефектного инструмента может носить комплексный характер. В этой связи совместная оценка перечисленных выше параметров АЭ является актуальной.

Анализ корреляционной взаимосвязи показал, что между контролируемыми параметрами АЭ бездефектного и дефектного инструмента есть статистически значимая корреляция, отличающаяся от нуля. В проанализированном наборе измерений наибольшая корреляция наблюдается у параметра $r_p = 0,595$ при сравнении с параметрами — $r_{СКО} = 0,526$, $r_A = 0,527$, $r_{RMS} = 0,526$, $r_{MARSE} = 0,525$. Используя оценочную шкалу Чеддока для интерпретации коэффициента корреляции, следует отметить, что параметрам $r_{СКО}$, r_A , r_p , r_{RMS} , r_{MARSE} свойственна прямая и заметная ($r_{0,5-0,7}$) корреляционная взаимосвязь. Установленная корреляция для данных параметров при $r > 0,5$ объясняется различием в значениях параметров информационной составляющей сигналов контролируемого бездефектного и дефектного инструмента.

Ранее в работах [2, 15] отмечалось, что вычисленные в настоящей статье параметры являются устойчивыми мешающими факторами среды и позволяют обнаружить корреляционные взаимосвязи параметров источника АЭ. В рамках данного исследования при использовании фильтра [8, 10] также обнаружены статистически значимые корреляции измерений ($p < 0,05$), характеризующие неслучайность полученной взаимосвязи. При ослаблении помеховой составляющей высокая корреляция результата измерений, а именно $r \sim 0,9$, может наблюдаться в информационной составляющей, зарегистрированной между парными преобразователями сигналов АЭ от единого источника [16], аналогично работам [2, 15].

Модель, характеризующая статистическую различимость параметров АЭ бездефектного и дефектного инструмента, разрабатывалась с помощью метода машинного обучения — линейной регрессии. Линейная регрессия является работоспособным и высокочувствительным к анализируемым данным методом, не требующим специального обучения выборки объекта контроля [17]. Проведенные на основе линейной регрессии исследования показали, что наиболее чувствительны к изменению модели показателей АЭ сигналов дефектного инструмента параметры σ_U , ΔU и MARSE. Данные результаты представлены на рис. 7—9 в виде диаграммы Тьюки (а) и регрессионной зависимости (б).

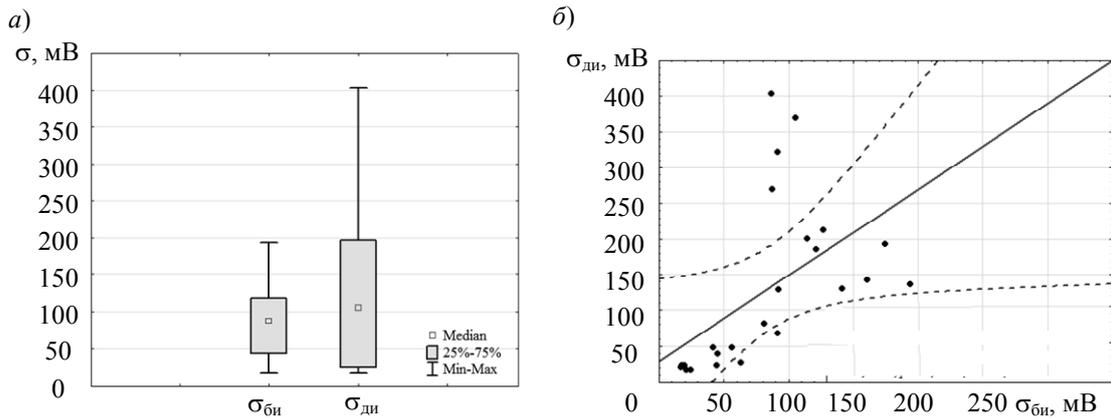


Рис. 7

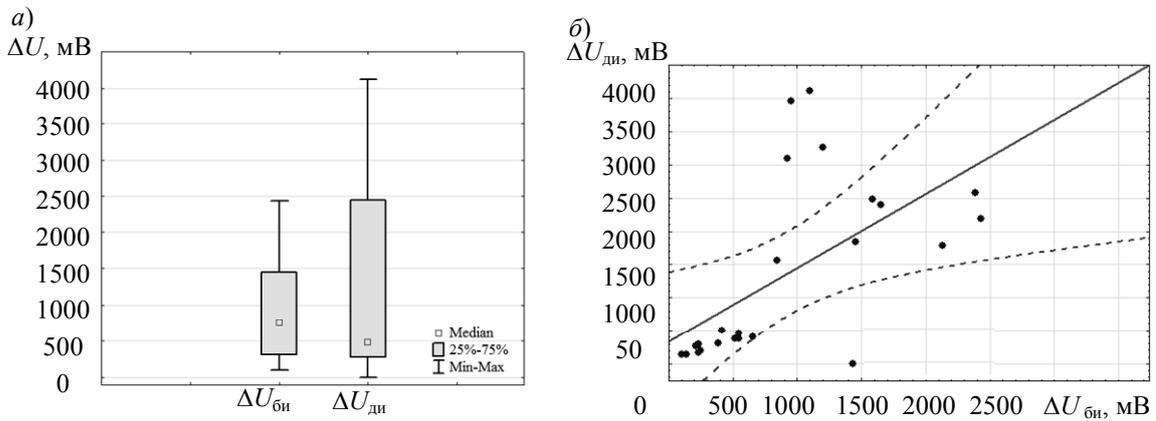


Рис. 8

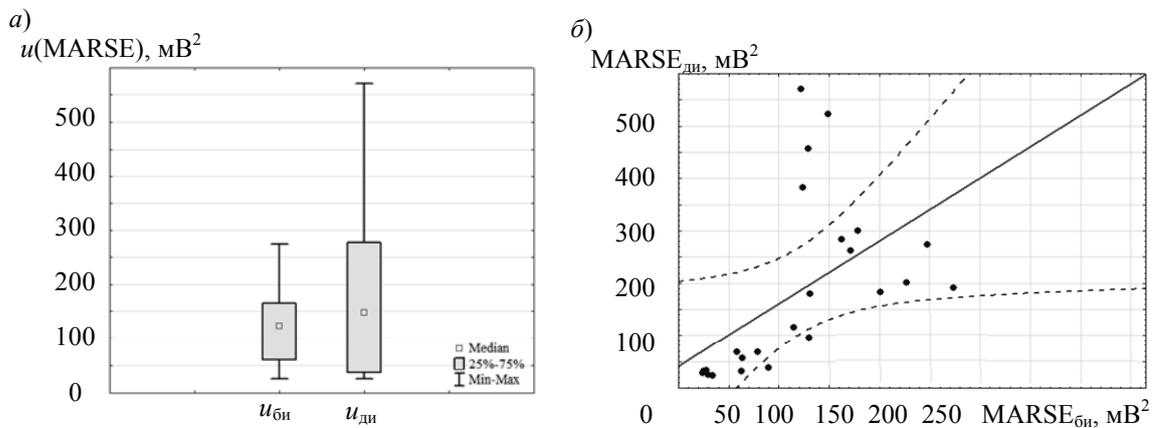


Рис. 9

Для оценки адекватности построенной регрессионной зависимости рассчитаны коэффициенты детерминации R^2 и корреляции r , а также уровня значимости p модели:

$$y_{\sigma, \text{дн}} = 29,088 + 1,201 \cdot \sigma_{\text{бн}} \text{ при } r = 0,526, R^2 = 0,277, p = 0,0082 \text{ (см. рис. 7);}$$

$$y_{\Delta U, \text{дн}} = 330,841 + 1,116 \cdot \Delta U_{\text{бн}} \text{ при } r = 0,595, R^2 = 0,354, p = 0,002 \text{ (см. рис. 8);}$$

$$y_{\text{MARSE}, \text{дн}} = 330,841 + 1,116 \cdot \text{MARSE}_{\text{бн}} \text{ при } r = 0,525, R^2 = 0,276, p = 0,008 \text{ (см. рис. 9).}$$

Из рис. 7—9 видно, что между контролируемыми параметрами сигналов бездефектного и дефектного инструмента существует также прямая корреляционная связь. Величина коэффициента детерминации R^2 построенной модели объясняет наблюдаемую дисперсию предиктора дефектного инструмента. Полученные коэффициенты с p -значением менее 0,01 считаются статистически значимыми для доверительного интервала с надежностью 0,99, т.е. свя-

занные параметры АЭ могут быть значимыми предикторами процессов дефектообразования, происходящих в инструменте с вероятностью надежности доверительного интервала. Накопленный на сегодняшний день экспериментальный материал подтверждает возможность применения вычисленных параметров для предиктивного анализа [18] технического состояния объектов контроля.

Заключение. Статья посвящена статистической оценке параметров АЭ при реализации метода обработки, основанного на двунаправленной полиномиальной цифровой фильтрации. Для подтверждения работоспособности метода получены результаты фильтрации зарегистрированных сигналов АЭ во время процесса фрезерования двумя инструментами. Показана различимость сигналов информационной составляющей при сравнении с зашумленными сигналами ($p < 0,05$) критерием Вилкоксона и вычислено отношение сигнал/помеха. На основании полученного результата установлено, что метод обработки АЭ позволяет повысить отношение сигнал/помеха до 4 дБ и улучшить фильтрацию высокочастотной помехи.

При контроле двух инструментов между параметрами АЭ установлена корреляционная взаимосвязь r — от $>0,5$ до $0,7$, определяющая прямую и заметную связь результатов измерений. Данная взаимосвязь может быть обусловлена различием свойств и характеристик источников АЭ при контроле двух инструментов для $p < 0,05$. На основе регрессионного анализа разработана модель, характеризующая различимость между параметрами АЭ при контроле бездефектного и дефектного инструмента, и имеющая статистическую значимость $p = 0,01$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бехер С. А., Бобров А. Л. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии / Под ред. Л. Н. Степанова. Новосибирск: СГУПС, 2013. 145 с.
2. Бехер С. А. Методы контроля динамически нагруженных элементов подвижного состава при ремонте и в эксплуатации на основе комплексного использования тензометрии и акустической эмиссии: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2017. 36 с.
3. Barat V., Borodin Y., Kuzmin A. Intelligent AE signal filtering methods // Journal of Acoustic Emission. 2010. Vol. 28. P. 109—119.
4. He Y. An overview of acoustic emission inspection and monitoring technology in the key components of renewable energy systems // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. Vol. 148. P. 107146.
5. Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А. Оценка влияния методов фильтрации на погрешность измерения параметров сигнала акустической эмиссии // Сб. тр. 25-й Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. СПб, 2022. С. 24—27.
6. Филоненко С. Ф. Влияние износа режущего инструмента при контролируемой глубине резания на акустическую эмиссию // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. Т. 6, №. 9. С. 47—50.
7. Прохоров С. А., Хаймович А. И., Столбова А. А., Кондратьев А. И. Моделирование процесса фрезерования по сигналу виброакустической эмиссии с помощью анализирующих вейвлетов Морле // Информационные технологии и нанотехнологии. 2017. Т. 5, №. 2. С. 1303—1309.
8. Altay Y. A., Fedorov A. V., Stepanova K. A. Acoustic emission signal processing based on polynomial filtering method // Proc. of the 2022 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. St. Petersburg, 2022. P. 1320—1326.
9. Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А. Дескриптивный анализ и оценка отношения сигнал/помеха, выработанных при реализации метода полиномиальной фильтрации сигналов акустической эмиссии // Сб. докл. 24-й Междунар. конф. „Цифровая обработка сигналов и ее применение“ DSPA – 2022. Москва, 2022. С. 78—82.
10. Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А., Кузиванов Д. О. Метод помехоустойчивой обработки для повышения точности измерения сигналов акустической эмиссии // Сб. тез. XXXIII Уральской конф. „Физические методы неразрушающего контроля“. Екатеринбург, 2022.
11. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1968. 504 с.

12. Gomez M. P. Assessment of cutting tool condition by acoustic emission // *Procedia Materials Science*. 2012. Vol. 1, N 2. P. 321—328.
13. Салин В. Н., Чурилова Э. Ю. Практикум по курсу „Статистика“. М.: Перспектива, 2002. 188 с.
14. Растегаев И. А., Мерсон Д. Л., Растегаева И. И. Подходы к анализу шумоподобной акустической эмиссии при беспороговом режиме ее регистрации // Сб. матер. Всерос. конф. „Актуальные проблемы метода акустической эмиссии“. Тольятти, 2018. С. 103—104.
15. Попков А. А. Методическое и алгоритмическое обеспечение акустико-эмиссионного контроля при ударном нагружении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2021. 24 с.
16. Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А. Оценка взаимосвязи информационных составляющих и помех сигналов акустической эмиссии // *Контроль. Диагностика*. 2022. Т. 25, № 6. С. 36—45.
17. Zakharov L. A., Martyushev D. A., Ponomareva I. N. Predicting dynamic formation pressure using artificial intelligence methods // *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. P. 23—32.
18. Elforjani M., Shanbr S. Prognosis of bearing acoustic emission signals using supervised machine learning // *IEEE Transactions on industrial electronics*. 2018. Vol. 65, N 7. P. 5864—5871.

Сведения об авторах

- Ельдос Алтай** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: aeldos@inbox.ru
- Алексей Владимирович Федоров** — д-р техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: avfedorov@itmo.ru
- Ксения Андреевна Степанова** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: ledy.xs93@yandex.ru
- Дмитрий Олегович Кузиванов** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: kuzivanovdmitry@gmail.com

Поступила в редакцию 07.06.2022; одобрена после рецензирования 25.07.2022; принята к публикации 31.08.2022.

REFERENCES

1. Bekher S.A., Bobrov A.L. *Osnovy nerazrushayushchego kontrolya metodom akusticheskoy emissii* (Fundamentals of Non-Destructive Testing by the Method of Acoustic Emission), Novosibirsk, 2013, 145 p.
2. Bekher S.A. *Metody kontrolya dinamicheski nagruzhennykh elementov podvizhnogo sostava pri remonte i v ekspluatatsii na osnove kompleksnogo ispol'zovaniya tenzometrii i akusticheskoy emissii* (Methods for Monitoring Dynamically Loaded Rolling Stock Elements during Repair and Operation Based on the Integrated Use of Strain Gauges and Acoustic Emission), Extended abstract of Doctor's thesis, Tomsk, 2017, 36 p. (in Russ.)
3. Barat V., Borodin C., Kuzmin A. *Journal of Acoustic Emission*, 2010, vol. 28, pp. 109—119.
4. He Y. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, vol. 148, pp. 107146.
5. Altay Y., Fedorov A.V., Stepanova K.A. *Sbornik trudov 25-y Mezhdunarodnoy konferentsii po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* (Proceedings of the 25th International Conference on Soft Computing and Measurement), St. Petersburg, 2022, pp. 24—27.
6. Filonenko S.F. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 2015, no. 9(6), pp. 47—50. (in Russ.)
7. Prokhorov S.A., Khaimovich A.I., Stolbova A.A., Kondratiev A.I. *Information technology and nanotechnology*, 2017, no. 2(5), pp. 1303—1309. (in Russ.)
8. Altay Y.A., Fedorov A.V., Stepanova K.A. *Proc. of the 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, St. Petersburg, 2022, pp. 1320—1326.
9. Altay Y., Fedorov A.V., Stepanova K.A. *24-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya „Tsfirovaya obrabotka signalov i yeye primeneniye“ DSPA-2022* (24th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications. DSPA-2022), Collection of reports, Moscow, 2022, pp. 78—82. (in Russ.)
10. Altay Y., Fedorov A.V., Stepanova K.A., Kuzivanov D.O. *Fizicheskiye metody nerazrushayushchego kontrolya* (Physical Methods of Non-Destructive Testing), Collection of abstracts of the XXXIII Ural conference, Yekaterinburg, 2022. (in Russ.)
11. Levin B.R. *Teoreticheskiye osnovy statisticheskoy radiotekhniki* (Theoretical Foundations of Statistical Radio Engineering), Moscow, 1968, 504 p. (in Russ.)
12. Gomez M.P. *Procedia Materials Science*, 2012, no. 2(1), pp. 321—328.
13. Salin V.N., Churilova E.Yu. *Praktikum po kursu „Statistika“* (Workshop on the Course „Statistics“), Moscow, 2002, 188 p. (in Russ.)
14. Rastegaev I.A., Merson D.L., Rastegaeva I.I. *Aktual'nyye problemy metoda akusticheskoy emissii* (Actual Problems of the Acoustic Emission Method), Collection of materials of the All-Russian Conference, Tolyatti, 2018, pp. 103—104. (in Russ.)
15. Popkov A.A. *Metodicheskoye i algoritmicheskoye obespecheniye akustiko-emissionnogo kontrolya pri udarnom nagruzhении* (Methodical and Algorithmic Support of Acoustic Emission Control under Shock Loading), Extended

abstract of candidate's thesis, Novosibirsk, 2021, 24 p. (in Russ.)

16. Altay Y., Fedorov A.V., Stepanova K.A. *Control. Diagnostics*, 2022, no. 6(25), pp. 36–45. (in Russ.)
17. Zakharov L.A., Martyushev D.A., Ponomareva I.N. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 253, pp. 23–32.
18. Elforjani M., Shanbr S. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2018, no. 7(65), pp. 5864–5871.

Data on authors

- Yeldos Altay** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: aeldos@inbox.ru
- Alexey V. Fedorov** — Dr. Sci., Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: avfedorov@itmo.ru
- Ksenia A. Stepanova** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: ledy.xs93@yandex.ru
- Dmitry O. Kuzivanov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: kuzivanovdmitry@gmail.com

Received 07.06.2022; approved after reviewing 25.07.2022; accepted for publication 31.08.2022.

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ПЛАВЛЕНОГО КВАРЦА
ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ МИКРОПЛАЗМОЙ И ОЧИСТКИ
НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МНОГОСЕКТОРНЫХ БИНАРНЫХ ФАЗОВЫХ ПЛАСТИН**

Г. К. Костюк, Д. С. Степанюк, В. А. Шкуратова*, А. А. Петров, Н. А. Нестеров

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

Аннотация. Исследовано влияние каждого этапа изготовления фазовых оптических элементов (ФОЭ), включающего запись ФОЭ лазерно-индуцированной микроплазмой и постобработку, на параметры микрогеометрии формируемого микрорельефа на поверхности ФОЭ, обеспечивающие их высокое качество и эффективность конверсии энергии. Также приводятся условия реализации каждого из этапов изготовления ФОЭ, позволяющие обеспечить повторяемость результатов по глубине микрогеометрии формируемого рельефа и значениям шероховатости его поверхности. Все исследования выполнены при использовании многосекторных бинарных фазовых пластин, выбор которых обусловлен относительной простотой их конструкции, по сравнению с другими ФОЭ аналогичного назначения. Показано, что лучшие результаты по значениям шероховатости поверхности ФОЭ при полном устранении частиц графита, загрязняющих поверхность многосекторных бинарных фазовых пластин, и возможных микро/нанодфектов и напряжений, возникающих в ходе записи технологией лазерно-индуцированной микроплазмы, достигаются постобработкой в виде отжига при температуре 900 °С в течение 1 ч.

Ключевые слова: лазерно-индуцированная микроплазма, кластерная абляция, постобработка, фазовые оптические элементы, многосекторные бинарные фазовые пластины, плавленый кварц

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО. Авторы выражают благодарность компании ООО „Лазерный Центр“ за предоставленное оборудование и Васильеву Олегу Сергеевичу, руководителю отдела „Поддержки и технологий“, за консультации.

Ссылка для цитирования: Костюк Г. К., Степанюк Д. С., Шкуратова В. А., Петров А. А., Нестеров Н. А. Влияние структурирования плавленого кварца лазерно-индуцированной микроплазмой и очистки на функционирование многосекторных бинарных фазовых пластин // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 10. С. 747—762. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-747-762.

**THE EFFECT OF FUSED QUARTZ STRUCTURING
BY LASER-INDUCED MICROPLASMA AND PURIFICATION
ON MULTISECTOR BINARY PHASE PLATES OPERATION**

G. K. Kostyuk, D. S. Stepanyuk, V. A. Shkuratova*, A. A. Petrov, N. A. Nesterov

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

Abstract. For each stage of phase optical elements (POEs) production, including the POEs recording with laser-induced microplasma and post-processing, the influence on the microgeometry parameters of the microrelief formed on the POE surface, which ensures their high quality and energy conversion efficiency, is studied. The conditions for the each of the POE manufacturing stages implementation providing repeatability of the stage results in terms of the formed microgeometry relief depth and characteristics of its surface roughness, are given. All the studies are carried out using multi-sector binary phase plates chosen for their relative simplicity of design compared to other POEs of a similar pur-

pose. It is shown that the best results on the PHE surface roughness with the complete elimination of graphite particles polluting the surface of multisectoral binary phase plates and possible micro/nanodefects and stresses arising during recording by laser-induced microplasma technology, are achieved by post-processing in the form of annealing at a temperature of 900 °C for 1 h.

Keywords: laser-induced microplasma, cluster ablation, post-processing, phase optical elements, multi-sector binary phase plates, fused quartz

Acknowledgments: The study was carried out with the financial support of the grant of the NORMA FT MF of ITMO University. The authors express their gratitude to Laser Center LLC for the equipment provided and to Oleg Sergeevich Vasiliev, Head of the Support and Technology Department, for consultations.

For citation: Kostyuk G. K., Stepanyuk D. S., Shkuratova V. A., Petrov A. A., Nesterov N. A. The effect of fused quartz structuring by laser-induced microplasma and purification on multisector binary phase plates operation. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 10. P. 747—762 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-747-762.

Введение. Изготовлению фазовых оптических элементов (ФОЭ), широко применяемых для преобразования гауссовых пучков с линейной и циркулярной поляризацией в скалярные и векторные вихревые пучки, используемые в таких наукоемких областях, как лазерная микро- и нанообработка [1, 2], оптическое манипулирование [3, 4], создание систем коммуникации [5] и систем обработки и хранения информации [6], в последние десятилетия уделяется все больше внимания. Изготовление ФОЭ и систем из них предполагает микроструктурирование поверхности стекла, полимера или фоторезиста, оно заключается в изменении масштаба микро- или нанорельефа их поверхности. В большинстве работ по изменению рельефа поверхности материала, на котором производится запись ФОЭ, является плавленный кварц, обладающий прозрачностью в широком диапазоне длин волн 0,19—2,60 мкм и характеризующийся высоким порогом разрушения, позволяющим использовать такие ФОЭ с лазерным излучением со сверхкороткими импульсами.

В настоящее время для изготовления спиральных фазовых пластин (СФП), конвертирующих гауссов пучок с линейной поляризацией в скалярный вихревой, наряду с нелазерными технологиями изготовления ФОЭ, такими как электронно-лучевая литография [7—11], электронно-лучевое осаждение [12], полутонная лазерная литография [13], фотолитография с последующим плазменным травлением [14], используются технологии прямой [15, 16] и непрямой лазерной записи [17—19].

Технология электронно-лучевой литографии, наиболее интенсивно исследуемая в последние годы, позволяет изготавливать СФП с большим количеством секторов, приближающим профиль СФП к непрерывному, и с высоким качеством, обеспечивающим эффективность конверсии энергии ~70 % как на полимерах [7, 9], так и на плавленном кварце [8, 11, 20]. Эта технология является многоэтапной, длительность изготовления СФП по которой может составлять несколько часов.

Технология электронно-лучевого осаждения, основанная на нанесении многослойного покрытия пленок оксида кремния при последовательном использовании нескольких масок, также является многоэтапной и характеризуется значительной длительностью изготовления СФП. Но увеличение числа секторов в СФП при использовании этой технологии приводит не только к значительному усложнению процесса изготовления, но и его длительности.

В технологии лазерной полутонной литографии с последующим травлением индуктивно-связанной плазмой изготовление ФОЭ, несмотря на исключение применения масок, также остается длительным многостадийным процессом. Длительность процесса изготовления ФОЭ в этой технологии соизмерима со временем изготовления, характерным для технологий, основанных на литографии. Кроме того, этой технологией невозможно изготовить СФП, число секторов в которой превышает число уровней полутонной шкалы.

Относительно менее сложной в реализации и менее длительной, по сравнению с упомянутыми выше технологиями изготовления ФОЭ, является технология фотолитографии с последующим плазменным травлением, позволяющая достичь отклонений по глубине травления ± 20 нм.

О применении технологии прямой лазерной записи фемтосекундными лазерными импульсами для изготовления СФП микронного размера впервые сообщалось в работе [21]: в качестве резиста, на котором проводилась запись, был использован SZ080, наносимый на стеклянную пластину. Запись выполнялась лазерными импульсами с длительностью 150/180 фс на центральной длине волны излучения 800 нм с использованием фокусирующего объектива с числовой апертурой $NA = 1,4$. Процесс записи характеризовался очень малым временем изготовления. Эта первая публикация о прямой лазерной записи положила начало быстро растущей области исследования процесса изготовления ФОЭ технологией прямой лазерной записи для генерации и контроля оптических вихревых пучков, эффективность генерации которых могла достигать 100 %. Такая высокая эффективность генерации была обусловлена не только высокой точностью изготовления частей ФОЭ, но и высокой прозрачностью пленок резиста после полимеризации [21, 22]. Однако относительно низкий порог разрушения стекол, на которых были записаны ФОЭ, ограничивал применение подобных ФОЭ в системах с высокомоментными фемтосекундными импульсами. Это ограничение было успешно преодолено применением плавленого кварца в качестве материала для записи [13]. Технологией прямой лазерной записи были изготовлены способные генерировать суперпозицию оптических вихревых пучков ФОЭ диаметром 500 мкм, известные как „многосекторные бинарные фазовые пластины“ (МБФП) [23].

Технология непрямой лазерной записи на прозрачных диэлектриках посредством лазерно-индуцированной микроплазмы (ЛИМП, или LIBBH — Laser Induced Black Body Heating) была применена для изготовления широкого класса ФОЭ на плавленом кварце [24, 25], включая СФП [26]. Данная технология используется не менее широко, чем прямая лазерная запись.

Под ЛИМП принято понимать лазерную эрозионную плазму, образующуюся на границе прозрачной и поглощающей сред при абляции последней. Особым условием существования ЛИМП является режим ограничения ее расширения, когда в качестве прозрачной среды используется жидкость или твердое тело. Особая разновидность плазмы, образующаяся в зазоре между прозрачной и поглощающей средами при размере зазора, соизмеримом с шероховатостью поверхностей этих сред, характеризуется специфическими параметрами, позволяющими применять ЛИМП для микроструктурирования прозрачных диэлектриков.

На действии ЛИМП, образующейся при абляции поглощающей среды, основан целый ряд технологий обработки прозрачных диэлектриков, к которым относятся: LIPAA (Laser Induced Plasma Assisted Ablation) [18], LIBDE (Laser Induced Back Side Dry Etching) [19, 27], LIFE (Laser Induced Front Side Etching) [28] и др. [29—33]. При использовании одних технологий прозрачная для лазерного излучения среда находится в плотном контакте с поглощающей мишенью [27, 33], при использовании других — на некотором небольшом расстоянии от нее [29, 31]. Величина зазора даже в случае одинаковых параметров лазерного излучения существенно влияет на свойства ЛИМП и, следовательно, на конфигурацию микроструктур, получаемых на поверхности прозрачной среды.

Технология обработки поверхности стекла ЛИМП [24, 25] реализуется при плотном контакте обрабатываемого стекла с массивной мишенью из графита, коэффициент поглощения которого близок к 1,0 для широкого диапазона длин волн. Она была использована для изготовления массивов микрооптических элементов [24] и фазовых решеток [25] на плавленом кварце.

Изучению свойств ЛИМП, образующейся в условиях плотного контакта графитовой мишени и диэлектрической пластины, посвящена работа [17], в которой показано, что формирование микрорельефа на поверхности стекла вызвано „кластерной“ абляцией ионами углерода в условиях избыточного давления, превышающего 1 ГПа, — подобный механизм микроstructuring обеспечивает значительно большую эффективность, по сравнению с эффективностью микроstructuring испарением или термической абляцией [34].

Управление микрогеометрией поверхности ФОЭ из оптически прозрачного для лазерного излучения материала основано на локальном действии ЛИМП, образующейся на мишени с высоким поглощением падающего на него излучения и с размерами и свойствами, определяемыми параметрами лазерного излучения и условиями возникновения ЛИМП. Одним из значимых условий возникновения и существования ЛИМП в процессе формирования микрорельефа на поверхности пластины плавленного кварца является плотный контакт между мишенью и поверхностью пластины, на тыльной стороне которой формируется микрорельеф.

Согласно технологии ЛИМП, процесс формирования микрорельефа на поверхности пластины плавленного кварца включает две стадии трансформации энергии: от энергии лазерного излучения к возникающей из-за сильного поглощения лазерного излучения на поверхности мишени плазмы и от плазмы — к энергии абляции плавленного кварца. Формирование микрорельефа на поверхности плавленного кварца является сложным многофакторным процессом, происходящим в условиях ограниченного объема ЛИМП. При формировании микрорельефа поверхности плавленного кварца уже после первого импульса лазерного излучения, приводящего к возникновению ЛИМП, частицы графита, испаряющиеся из зоны облучения при осаждении на поверхность формируемого рельефа и на поверхность разрушаемой мишени, будут поглощать часть энергии падающего на них излучения и тем самым вносить вклад в глубину формируемого рельефа.

Частицы графита, осажденные на поверхность плавленного кварца и на поверхность разрушаемой мишени в области действия ЛИМП, способны поглощать часть энергии лазерных импульсов (всех, начиная со второго) и тем самым снижать энергию разрушения графита мишени, поддерживающей ЛИМП. Сложность процесса преобразования энергии в технологии ЛИМП при формировании микрорельефа ФОЭ не позволяет установить прямых аналитических зависимостей между режимом лазерного облучения, условиями возникновения и существования ЛИМП и глубиной травления формируемого микрорельефа. Именно этим объясняется необходимость предварительной записи так называемой карты глубин, устанавливающей связь между параметрами лазерного облучения и условиями возникновения формируемого микрорельефа. Карта глубин представляет собой двумерный массив элементарных ячеек в форме квадрата с размером стороны 500 мкм, разделенных между собой расстоянием более 500 мкм (для уменьшения искажений записи, вызываемых тепловыми явлениями, сопровождающими запись).

При записи карты глубин варьировались следующие параметры: средняя мощность лазерного излучения P , скорость сканирования S и частота следования импульсов ν . Длительность импульса составляла 50 нс. При записи карты глубин не учитывалось многократное прохождение сфокусированного лазерного пучка по поверхности плавленного кварца (N — число проходов), в ряде случаев являющееся обязательным для достижения требуемого микрорельефа ФОЭ.

Как показали измерения глубины травления в областях, подвергшихся многократным проходам, параметр N является не менее важным параметром, чем P , S и ν . Рельеф поверхности ФОЭ в технологии ЛИМП формировался в соответствии с выбранными параметрами из карты глубин, линия за линией с шагом сканирования не более 2—4 % от диаметра пучка, сфокусированного на границу контакта плавленного кварца и мишени.

Все технологии микроструктурирования поверхности стекла, базирующиеся на образовании ЛИМП на сильно поглощающей лазерное излучение мишени, могут приводить к загрязнению стекла частицами мишени, а в некоторых случаях — к переносу частиц на поверхность стекла в процессе кластерной абляции под действием ЛИМП и ее последующей рекомбинации. Под действием ЛИМП также возможно увеличение шероховатости поверхности формируемого микрорельефа, появление нано- и микродефектов и напряжений.

Загрязнение поверхности ФОЭ частицами графита после записи микрорельефа технологией ЛИМП устраняют методы постобработки: влажная лазерная очистка, отжиг в печи, обработка в водном растворе щелочи или кислоты с последующим промыванием в воде. Параметры влажной лазерной очистки, отжига и обработки в водном растворе щелочи или кислоты определяются экспериментально с учетом рекомендаций по каждому из процессов [35, 36]. При выборе способа очистки учитываются его длительность и сложность, возможность не только полного устранения частиц графита, нано- и микродефектов на поверхности микрорельефа ФОЭ и напряжений, а также уменьшение шероховатости микрорельефа, образующегося в ходе записи ФОЭ, по сравнению со исходными значениями шероховатости пластины плавленого кварца.

Исследования различных способов очистки, выполненные в работе [35] на основе сравнения спектральных характеристик плавленого кварца после обработки ЛИМП в диапазоне 400—900 нм, а также в спектре люминесценции в диапазоне 400—550 нм, позволили установить, что лучшие результаты по устранению частиц графита были достигнуты при использовании влажной лазерной очистки и очистки отжигом в печи. При этом отмечалось, что и влажная лазерная очистка, и очистка отжигом в печи обеспечивают полное удаление частиц графита. Однако несмотря на значительно меньшую длительность первого процесса (30—40 с) по сравнению с длительностью второго (~ 3 ч), отжиг в печи представляется более предпочтительным, поскольку при этом возможно устранение микро- и нанодфектов и возможных напряжений, возникающих при записи. Из-за существенного уменьшения пропускания в спектрах в диапазоне 400—900 нм — более чем в два раза, по сравнению со значениями пропускания пластины плавленого кварца, на которой записывались соответствующие ФОЭ, и более чем на треть в спектре люминесценции после проведения процесса очистки в водном растворе HNO_3 — в дальнейшем было решено отказаться от нее.

В работе [26] в качестве постобработки использовались отжиг в печи при температуре 900 °С в течение 3 ч и обработка в водном растворе NaOH (концентрация раствора 38,5 %, температура 70 °С, длительность 90 мин), осуществляемые после влажной лазерной очистки. В результате обеспечено полное устранение частиц графита в обоих случаях и уменьшение шероховатости поверхности в вытравленных секторах СФП до значений $(25\text{—}30) \pm 10$ нм, близких по значению к шероховатости поверхности пластины плавленого кварца, на которой проводилась запись СФП (30 ± 10 нм).

Несмотря на соизмеримое снижение шероховатости поверхности в вытравленных секторах СФП, от постобработки в водном растворе NaOH в дальнейшем решено было отказаться, так как эффективность конверсии энергии СФП, прошедшей после записи отжиг, оказалась почти на 10 % выше, чем у СФП, прошедшей после записи постобработку в водном растворе NaOH .

Поскольку фактически изготовление ФОЭ на базе технологии ЛИМП включает этап записи и постобработки (этап очистки), параметры каждого из которых в основном базируются на экспериментальных результатах, важно детально изучить и определить влияние каждого из этапов на конечный результат — параметры микрогеометрии формируемого рельефа ФОЭ, обеспечивающие особенности его функционирования. В качестве исследуемых ФОЭ будут использоваться МБФП, такой выбор обусловлен относительной простотой конструкции МБФП, по сравнению с другими ФОЭ аналогичного назначения.

Таким образом, целью настоящей работы является определение влияния этапа записи технологией ЛИМП и этапа очистки на параметры микрогеометрии формируемого рельефа ФОЭ, обеспечивающие его высокое качество. Дополнительно будут определены условия, позволяющие обеспечить повторяемость результатов по микрогеометрии формируемого рельефа ФОЭ.

Соответствие глубины травления в секторах МБФП расчетным значениям, их отклонение по глубине в различных секторах и шероховатость поверхности в этих секторах будут исследованы на профилометре Hommel Tester T8000 с разрешением по глубине ± 10 нм. Качество функционирования МБФП и эффективность конверсии энергии будут оценены в схеме тестирования с наносекундным лазером IRG YLPN-50 с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм.

Для оценки повторяемости результатов и параметров микрогеометрии формируемого рельефа с марта 2021 г. по март 2022 г. с интервалом 2—6 месяцев технологией ЛИМП были записаны пять МБФП с одинаковыми параметрами, выбранными из карты глубин, при применении одной и той же мишени, на пластинах плавленого кварца из одной партии. После записи всех МБФП выполнялась постобработка. Оценка повторяемости результатов изготовления МБФП производилась сравнением глубины травления и значений шероховатости в вытравленных секторах МБФП, эффективности конверсии, осуществляемой МБФП, и качеством их функционирования.

Принцип работы многосекторных бинарных фазовых пластин. Описание конструкции МБФП, состоящей из равного числа не вытравленных и вытравленных на определенную глубину секторов, обеспечивающих сдвиг фазы в π или в $\pi/2$ проходящего через эти сектора излучения, и принцип их работы приведены в работах [14, 23, 37].

Известно, что МБФП может быть рассмотрена как СФП, упрощенная до двух уровней фазы 0 и π . Распределение интенсивности, генерируемое такой МБФП в дальнем поле в параксиальном приближении при $\cos\varphi \rightarrow 1$, $\sin\varphi \rightarrow 0$ (где φ — азимутальная координата) будет представлять суперпозицию скалярных вихревых пучков с противоположными топологическими зарядами $\pm 1/2$ [38]. МБФП, выполненная для фаз 0 и $\pi/2$, может быть рассмотрена как СФП, упрощенная до двух уровней фазы 0 и $\pi/2$. В этом случае распределение интенсивности в дальнем поле, генерируемое такой МБФП, в параксиальном приближении будет представлять суперпозицию скалярных вихревых пучков одного знака [37].

МБФП, в отличие от остальных ФОЭ (таких как СФП [7—11], q -пластины [39, 40], s -пластины [41, 42] и вихревые полуволновые пластины [43], изготавливаемые на плавленом кварце и используемые в настоящее время для генерации из одиночного гауссова пучка), способна генерировать суперпозицию скалярных или векторных вихревых пучков [14, 23]. В публикациях последних лет сообщается о применении МБФП как для генерации суперпозиции скалярных вихревых пучков [23], так и о трансформации цилиндрических векторных пучков первого порядка в гибридные пучки более высоких порядков [14]. Применение МБФП, в первую очередь, обусловлено простотой их конструкции, изготовления и надежностью функционирования. Конструкция МБФП, состоящей из равного числа одинаковых по площади не вытравленных и вытравленных на одинаковую глубину секторов, является более простой по сравнению с конструкцией СФП, глубина травления в секторах которой пошагово возрастает с увеличением номера сектора. Этот факт делает МБФП менее сложным объектом для изучения особенностей изготовления ФОЭ технологией ЛИМП.

Глубина травления в половине секторов МБФП определяется исходя из представления о фазовом сдвиге в π или $\pi/2$, создаваемом в этих секторах по отношению к не вытравленным секторам. Сдвиг фазы π в вытравленных секторах МБФП по отношению к не вытравленным достигается при травлении этих секторов на глубину:

$$h_{\pi} = \frac{\lambda}{2(n_1 - n_2)}, \quad (1)$$

где n_1 — показатель преломления плавленного кварца для длины волны излучения λ , падающего на МБФП; n_2 — показатель преломления среды, в которой предполагается функционирование МБФП (воздух).

Сдвиг фазы $\pi/2$ в вытравленных секторах МБФП по отношению к не вытравленным достигается при травлении этих секторов на глубину:

$$h_{\pi/2} = \frac{\lambda}{4(n_1 - n_2)}. \quad (2)$$

При показателе преломления плавленного кварца 1,4496 для длины волны $\lambda = 1,06$ мкм, на которой будет тестироваться качество МБФП и эффективность конверсии энергии, глубина травления, найденная из уравнений (1) и (2), составляет соответственно 1,183 и 0,591 мкм.

Как было показано в работе [23], качество функционирования МБФП (под которым понимается соответствие генерируемого МБФП в дальнем поле распределения интенсивности теоретическим представлениям, согласно которым интенсивность в центральной области стремится к нулю, а интенсивность в окружающих ее по периметру пространственно-разделенных дифракционно-ограниченных пятнах одинакова, при этом ДОП имеют четкие очертания в форме круга) определяется:

- соответствием глубины травления в различных секторах МБФП расчетным значениям;
- отклонением глубины травления в различных секторах МБФП от расчетного значения;
- значением шероховатости поверхности в вытравленных секторах.

Экспериментальная установка для изготовления многосекторных бинарных фазовых пластин. Для изготовления МБФП использовалась технология ЛИМП [17, 24—26], которая была реализована на экспериментальной установке, представленной на рис. 1.

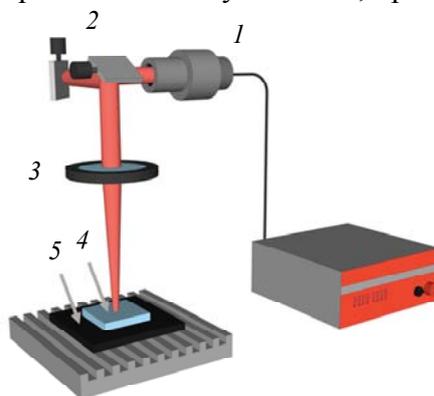


Рис. 1

Лазерные импульсы от Yb-волоконного лазера (длина волны 1,06 мкм) 1 длительностью 50 нс, средней мощностью до 20 Вт и частотой 1—100 кГц были направлены в зону обработки гальванометрическими сканерами (G325DT GSI Lumonics) 2. Объектив F-theta 3 с фокусным расстоянием 210 мм создавал диаметр перетяжки пучка $d_0 = 50$ мкм. Излучение фокусировалось в области плотного контакта пластины из плавленного кварца 4 и графитовой мишени 5 с коэффициентом поглощения $A \sim 1,0$ в диапазоне длин волн от 0,2 до 2,0 мкм. Тыльная поверхность пластины 4 была модифицирована в соответствии с требуемой геометрией под воздействием эрозионного плазменного факела (давление ~ 1 ГПа, температура $> 10^3$ °C), возникающего при сканировании лазерного пучка в плоскости контакта пластины из 4 и 5. Эрозионный плазменный факел в режиме удержания (ограничения расширения) нагревал противоположную сторону пластины из кварца 4 до температур $> 10^3$ °C и создавал абляцию [17]. Применение ЛИМП для формирования требуемых структур, как указывалось ранее, сопровождается

осаждением частиц графита на сформированные структуры. Ранее нами была использована влажная лазерная очистка [35], продолжительность которой не превышает 30—40 с.

При выборе режимов записи МБФП с уровнями фаз 0 и π авторы руководствовались результатами предварительной записи карты глубин на плавленом кварце, варьируемыми параметрами в которой были мощность P (8—16 Вт), скорость сканирования S (50—150 мм/с), частота следования импульсов ν (20—30 кГц) и число сканирований N сфокусированного лазерного пучка на границу соприкосновения плавленого кварца и мишени. Длительность импульса при записи массива элементарных ячеек карты глубин во всех случаях составляла 50 нс. Режимы записи МБФП с уровнями фаз 0 и π выбирались по результатам анализа экспериментальных данных массивов элементарных ячеек карты глубин, обеспечивающих формирование микрорельефа приемлемого качества без значительных трещин, глубоких сколов и напряжений с шероховатостью, не превышающей 50 ± 10 нм, обеспечиваемой технологией ЛИМП.

Фрагмент карты глубин с глубинами элементарных ячеек, записанных при различных режимах лазерного облучения с варьируемым числом проходов для $S = 100$ мм/с, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Фрагмент карты глубин					
N	P , Вт				
	8	10	12	14	16
1	335	387	443	469	474
3	902	1099	1192	1229	1452
5	1493	1709	2165	2209	2292

Плотность мощности лазерного излучения в импульсе, приходящаяся на область лазерного воздействия на границе плавленого кварца и мишени из графита, обеспечивающая заданную глубину травления, определялась как:

$$q = \frac{1}{\nu\tau} \cdot \frac{4P}{\pi d_0^2}, \quad (3)$$

а плотность энергии в импульсе, приходящаяся на область лазерного воздействия:

$$\varepsilon = \frac{4P}{\pi d_0^2 \nu}. \quad (4)$$

Поскольку формирование микрорельефа осуществлялось с использованием сканирующей системы, важным параметром для оценки было число импульсов, попадающих в зону воздействия:

$$k = \frac{d_0 \nu}{S}, \quad (5)$$

где S — скорость сканирования по одной координате x или y .

Диапазон значений k для формирования микроструктур на плавленом кварце оценивался как 20—80. За одно сканирование глубина вытравленной области могла изменяться от 0,03 до 1,18 мкм. В случае необходимости достижения большей глубины следует последовательно выполнить N сканирований.

Типичная зависимость глубины формируемого микрорельефа на плавленом кварце от числа импульсов, приходящихся на область воздействия, представлена на рис. 2, а, а на рис. 2, б — зависимость глубины формируемого микрорельефа от плотности энергии при различном числе сканирований.

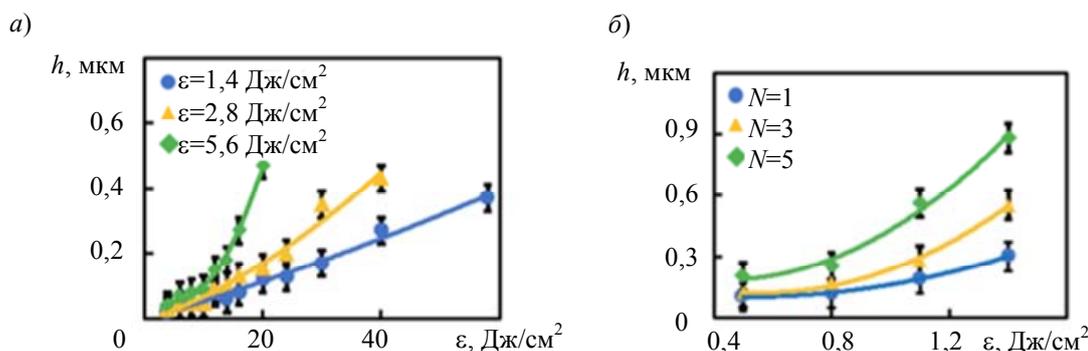


Рис. 2

Исследование влияния постобработки на шероховатость поверхности многосекторных бинарных фазовых пластин. Ориентируясь на результаты постобработки ФОЭ, записанных технологией ЛИМП [29, 40], для выявления наиболее эффективного способа, обеспечивающего полное устранение не только загрязнения поверхности ФОЭ частицами графита, но и микро- и нанодфектов, напряжений, возникающих в процессе записи ФОЭ, а также снижение возрастающих значений шероховатости поверхности, сопровождающих запись, по сравнению со значениями шероховатости поверхности исходной пластины, авторы выбрали: (1) влажную лазерную очистку, (2) влажную лазерную очистку, сопровождаемую отжигом, (3) отжиг в печи.

Исследование значений шероховатости поверхности после соответствующего варианта постобработки проводилось на элементарных ячейках карты глубин для $P = 18$ Вт, $\nu = 20$ кГц, $S = 150$ мм/с. Значения шероховатости поверхности в элементарных ячейках, полностью покрытых частицами графита, а также значения шероховатости поверхности после соответствующего варианта постобработки представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значение параметров шероховатости поверхности в исследуемых ячейках карты глубин по результатам постобработки

R_q , нм	Постобработка	N
52,0	Отсутствует	3
57,0	Влажная очистка	
32,0	Влажная очистка + отжиг	
50,0	Отсутствует	5
59,0	Влажная очистка	
33,0	Влажная очистка + отжиг	
52,0	Отсутствует	7
58,0	Влажная очистка	
30,0	Влажная очистка + отжиг	

Значения шероховатости поверхности, представленные в табл. 2 и 3, определялись по критерию R_q — среднеквадратичному значению отклонения профиля в пределах базовой длины:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx}, \tag{6}$$

где l — базовая длина, y — отклонение профиля от средней линии.

Таблица 3

Значение параметров шероховатости поверхности после записи и отжига

R_q , нм	$R_q/R_{q,пл}$	Постобработка	N
48,0	1,60	Отсутствует	7
30,0	1,00	Отжиг	
50,0	1,67	Отсутствует	9
30,0	1,00	Отжиг	
51,0	1,70	Отсутствует	11
29,0	0,97	Отжиг	

Отношение значения шероховатости поверхности, достигаемого отжигом в печи, для двух элементарных ячеек к значению шероховатости поверхности исходной пластины плавленного кварца представлены в табл. 3 ($P = 18$ Вт, $\nu = 30$ кГц, $S = 150$ мм/с, $R_{q \text{ пл}} = 30 \pm 10$ нм). Из результатов, представленных в табл. 2 и 3, видно, что постобработка отжигом в печи позволила достичь значений шероховатости МБФП, соизмеримых со значениями шероховатости исходной пластины плавленного кварца, составляющей в нашем случае 30 ± 10 нм.

В ходе первых экспериментов по отжигу МБФП постобработка в печи составляла 3 ч. Однако поиск дополнительных материалов по отжигу сложных микрорезонаторов, выполненных на плавленном кварце (таких как гироскопы [44], полусферические резонаторы [45], микрорезонаторные устройства MEMS [46]), позволил выявить рекомендации по длительности и температуре отжига.

В частности, исследования [46], направленные на снижение шероховатости с сохранением низких структурных деформаций микрорезонаторных устройств MEMS, в которых температура отжига варьировалась в диапазоне $300\text{—}900$ °С, а длительность от 2 до 240 мин, показали, что уже при температуре выше 700 °С шероховатость поверхности стала уменьшаться из-за снижения вязкости плавленного кварца. Были определены режимы, обеспечивающие наибольшее улучшение шероховатости при низких структурных деформациях. Один из них занимал 30 мин, а второй, обеспечивающий большее улучшение шероховатости поверхности при средних структурных деформациях, выполнялся при той же температуре 900 °С, но в течение 240 мин.

Обеспечить низкие значения шероховатости поверхности в микрогеометрии ФОЭ гораздо важнее, чем избегать незначительных структурных деформаций массивных пластин плавленного кварца, на которых записывается ФОЭ. Это и явилось одной из основных причин, по которой авторы сохранили температуру, используемую ранее при отжиге СФП [27], но сократили длительность отжига до 1 ч.

Все значения шероховатости поверхности (см. табл. 2 и 3) были измерены после отжига при температуре 900 °С, выполненного в течение 1 ч. Скорость нагрева пластин с МБФП, как и в более ранних экспериментах по отжигу СФП, варьировалась в диапазоне $5\text{—}7$ °С/мин, охлаждение осуществлялось в условиях отключения печи. Сокращение времени отжига не повлияло на значения шероховатости поверхности, которые были получены нами ранее в экспериментах по определению температуры и длительности отжига СФП [26].

Экспериментальная установка для тестирования многосекторных бинарных фазовых пластин. Схема экспериментальной установки для определения эффективности конверсии энергии, осуществляемой МБФП, и оценки качества ее функционирования показана на рис. 3. Данная экспериментальная установка позволяла осуществить микрообработку образцов из полированной стали.

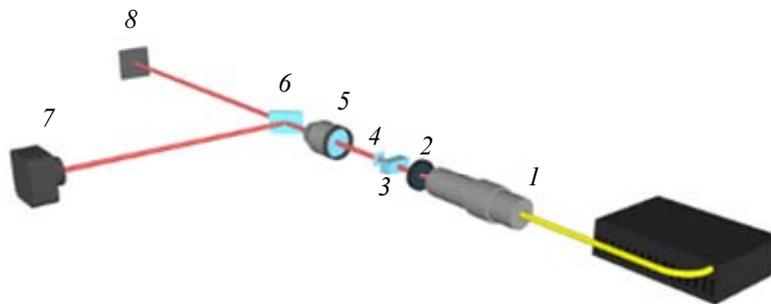


Рис. 3

Лазерный пучок (диаметр 7 мм, длина волны $1,06$ мкм, длительность импульса 120 нс, максимальная частота 100 кГц, качество пучка $M^2 < 2$, энергия импульса до 1 мДж и средняя мощность до 50 Вт) от лазерного источника (IPG YLPN 1-50) 1 проходил через нейтральный фильтр 2, линейный поляризатор (призма Глана) 3, МБФП 4, фокусирующий объектив 5

с фокусным расстоянием 170 мм и светоделительное зеркало 6. Менее 1 % падающего на зеркало 6 и сфокусированного лазерного излучения отражалось на ПЗС-камеру 7, расположенную в фокальной плоскости линзы 5. ПЗС-камера была размещена на трехкоординатном столике. Другая часть сфокусированного лазерного пучка проходила через зеркало 6 и попадала на образцы полированной стали 8. Эти образцы были размещены на трехкоординатном столике, расположенном в фокальной плоскости объектива 5.

Влияние постобработки на эффективность конверсии энергии, осуществляемой каждой из трех МБФП, и ее функционирование, последовательно исследовалось на экспериментальной установке.

Для определения эффективности конверсии энергии измерялись мощность $P_{\text{вх}}$ падающего на МБФП пучка лазерного излучения и мощность $P_{\text{вых}}$ пучка лазерного излучения, прошедшего через МБФП:

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} . \quad (7)$$

Для МБФП, прошедшей постобработку влажной лазерной очисткой, $\eta \sim 84$ %; для МБФП, прошедшей постобработку влажной лазерной очисткой, сопровождаемой отжигом, $\eta \sim 89$ %; для МБФП, прошедшей постобработку отжигом в печи, $\eta \sim 92$ % — этот уровень близок к теоретически возможному, обусловленному потерями на отражении на поверхностях МБФП.

Полученные значения эффективности конверсии энергии МБФП, как и значения шероховатости, показывают явное преимущество применения постобработки отжигом в печи.

Качество функционирования МБФП определяли последовательной регистрацией картин распределения интенсивности каждой из трех тестируемых МБФП в окрестностях дальнего поля, а также в одной из плоскостей, смещенной относительно фокальной плоскости фокусирующего объектива вдоль направления оптической оси (удаленного от фокусирующего объектива либо приближенного к нему). Смещение плоскости регистрации распределений интенсивности, создаваемых МБФП, относительно фокальной плоскости фокусирующего объектива предпринималось для выявления областей, где возможно повышение контраста между центральной темной областью и формируемым массивом дифракционно-ограниченных пятен, окружающим центральную область с нулевой интенсивностью.

На рис. 4 представлены распределения интенсивности, создаваемые каждой из трех тестируемых МБФП с уровнями фазы 0 и π в окрестностях дальнего поля в фокальной плоскости объектива и в плоскости повышенного контраста. Видно, что лучшие результаты по качеству функционирования показали МБФП, прошедшие постобработку отжигом в печи, на что указывает одинаковый диаметр дифракционно-ограниченных пятен и их четкие очертания.

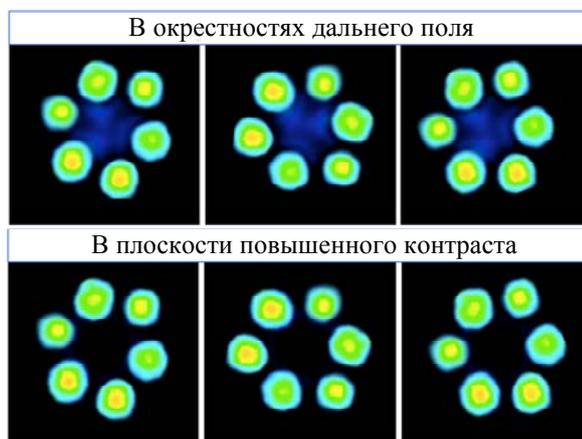


Рис. 4

Заключение. Так как фактически изготовление ФОЭ включает этап записи ФОЭ технологией ЛИМП и этап постобработки, предназначенный для устранения частиц графита с поверхности ФОЭ, возможных микро-, нанодфектов и напряжений, появление которых нельзя полностью исключить даже при самых щадящих режимах записи, а также для уменьшения шероховатости микрорельефа ФОЭ, возрастающего при любых режимах записи, а оба этапа изготовления базируются в основном на экспериментальных данных, то детальное определение влияния каждого из этапов на конечный результат исключительно важно. Только соответствие рассчитанной глубины травления и минимально возможная шероховатость поверхности микрогеометрии формируемого рельефа ФОЭ способны обеспечить высокое качество функционирования ФОЭ и высокую эффективность конверсии энергии, осуществляемой им. В качестве ФОЭ, процесс изготовления которого детально исследован, использованы МБФП, выбор которых обусловлен относительной простотой конструкции, по сравнению с другими ФОЭ аналогичного назначения.

Исследование позволило установить, что выбор режимов записи МБФП из предварительно записанной карты глубин, варьируемыми параметрами в которой являлись мощность излучения P , скорость сканирования S , частота следования импульсов ν и число сканирований N , позволяет обеспечить требуемую для функционирования глубину травления в половине секторов МБФП, измеренное значение которой составило 1180 ± 10 нм при рассчитанной глубине 1183 нм. Исследование было выполнено на трех шестисекторных МБФП с уровнями фазы 0 и π , рассчитанными для применения на $\lambda = 1,06$ мкм.

Исследования также позволили установить, что лучшие результаты по снижению шероховатости поверхности МБФП от 50 ± 10 нм, обеспечиваемому технологией ЛИМП, до 30 ± 10 нм при полном устранении частиц графита, загрязняющих поверхность МБФП, микро-, нанодфектов и напряжений, изредка сопровождающих запись, достигаются после постобработки отжигом в печи при температуре 900°C в течение 1 ч.

Были определены условия реализации каждого из этапов изготовления МБФП, позволяющие обеспечить повторяемость результатов по глубине травления формируемого рельефа МБФП и значениям его шероховатости, которые, в свою очередь, позволяли обеспечить высокую эффективность конверсии энергии ($\sim 92\%$) МБФП, что было подтверждено измерением распределения интенсивности, создаваемого МБФП и в окрестностях дальнего поля, и в плоскости повышенного контраста, ПЗС-камерой. К этим условиям на этапе записи относятся использование:

- для записи МБФП одной и той же экспериментальной установки;
- одной и той же пластины графита с шероховатостью поверхности, не превышающей 1 мкм;
- пластин плавленного кварца, на которых производится запись, из одной и той же партии изготовления.

На этапе отжига требуется соблюдение параметров отжига по температуре и длительности, определенных экспериментально.

Все пять шестисекторных МБФП с уровнями фазы 0 и π , рассчитанные для применения с $\lambda = 1,06$ мкм, записанные технологией ЛИМП в течение года на одной и той же экспериментальной установке с одними и теми же параметрами записи, выбранными из карты глубин, на пластинах плавленного кварца из одной партии изготовления, при использовании одной и той же пластины графита с шероховатостью поверхности менее 1 мкм, и прошедшие постобработку отжигом в печи при 900°C в течение 1 ч, показали одинаковые значения глубины формируемого рельефа в вытравленных секторах (1180 ± 10 нм) при шероховатости его поверхности 30 ± 10 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hnatovsky C.* et al. Polarization-dependent ablation of silicon using tightly focused femtosecond laser vortex pulses // *Opt. Lett.* 2012. Vol. 37, N 2. P. 226—228.
2. *Syubaev S.* et al. Direct laser printing of chiral plasmonic nanojets by vortex beams // *Opt. Express.* 2017. Vol. 25, N 9. P. 10214—10223.
3. *Chen M.* et al. Dynamics of microparticles trapped in a perfect vortex beam // *Opt. Lett.* 2013. Vol. 38, N 22. P. 4919—4922.
4. *Ng J., Lin Z., Chan C. T.* Theory of optical trapping by an optical vortex beam // *Phys. Rev. Lett.* 2010. Vol. 104, N 10. P. 103601.
5. *Wang J.* et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing // *Nat. Photonics.* 2012. Vol. 6, N 7. P. 488—496.
6. *Nagali E.* et al. Quantum information transfer from spin to orbital angular momentum of photons // *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 103, N 1. P. 013601.
7. *Massari M.* et al. Fabrication and characterization of high-quality spiral phase plates for optical applications // *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54, N 13. P. 4077—4083.
8. *Cheong W. C.* et al. Direct electron-beam writing of continuous spiral phase plates in negative resist with high power efficiency for optical manipulation // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 85, N 23. P. 5784—5786.
9. *Ruffato G.* et al. Spiral phase plates with radial discontinuities for the generation of multiring orbital angular momentum beams: fabrication, characterization, and application // *Opt. Eng.* 2015. Vol. 54, N 11. P. 111307.
10. *Ruffato G.* et al. Generation of high-order Laguerre–Gaussian modes by means of spiral phase plates // *Opt. Lett.* 2014. Vol. 39, N 17. P. 5094—5097.
11. *Shi L.* et al. One exposure processing to fabricate spiral phase plate with continuous surface // *Opt. Express.* 2015. Vol. 23, N 7. P. 8620—8629.
12. *Sueda K.* et al. Laguerre-Gaussian beam generated with a multilevel spiral phase plate for high intensity laser pulses // *Opt. Express.* 2004. Vol. 12, N 15. P. 3548—3553.
13. *Jun C.* et al. Generation of optical vortex using a spiral phase plate fabricated in quartz by direct laser writing and inductively coupled plasma etching // *Chin. Phys. Lett.* 2009. Vol. 26, N 1. P. 014202.
14. *Khonina S. N.* et al. Formation of hybrid higher-order cylindrical vector beams using binary multi-sector phase plates // *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8, N 1. P. 1—11.
15. *Brasselet E.* et al. Photopolymerized microscopic vortex beam generators: Precise delivery of optical orbital angular momentum // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97, N 21. P. 211108.
16. *Zukauskas A.* et al. Monolithic generators of pseudo-nondiffracting optical vortex beams at the microscale // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 103, N 18. P. 181122.
17. *Veiko V. P.* et al. Laser-induced microplasma as a tool for microstructuring transparent media // *Quantum Electron.* 2017. Vol. 47, N 9. P. 842—848.
18. *Zhang J., Sugioka K., Midorikawa K.* High-speed machining of glass materials by laser-induced plasma-assisted ablation using a 532-nm laser // *Appl. Phys. A.* 1998. Vol. 67, N 4. P. 499—501.
19. *Cheng J.-Y.* et al. Crack-free direct-writing on glass using a low-power UV laser in the manufacture of a microfluidic chip // *J. Micromech. Microeng.* 2005. Vol. 15, N 6. P. 1147—1156.
20. *Harm W.* et al. Adjustable diffractive spiral phase plates // *Opt. Express.* 2015. Vol. 23, N 1. P. 413—421.
21. *Ovsianikov A.* et al. Ultra-low shrinkage hybrid photosensitive material for two-photon polymerization microfabrication // *ACS Nano.* 2008. Vol. 2, N 11. P. 2257—2262.
22. *Malinauskas M.* et al. Mechanisms of three-dimensional structuring of photo-polymers by tightly focussed femtosecond laser pulses // *Opt. Express.* 2010. Vol. 18, N 10. P. 10209—10221.
23. *Zhou L.* et al. Directly writing binary multi-sector phase plates on fused silica using femtosecond laser // *High Power Laser Sci.* 2018. Vol. 6, N e6. DOI:10.1017/hpl.2018.1.

24. *Kostyuk G. K.* et al. Fast microstructuring of silica glasses surface by NIR laser radiation // *Opt. Lasers Eng.* 2015. Vol. 68. P. 16—24.
25. *Kostyuk G.K.* et al. Laser microplasma as a tool to fabricate phase grating applied for laser beam splitting // *Opt. Lasers Eng.* 2017. Vol. 92. P. 63—69.
26. *Shkuratova V.* et al. Rapid fabrication of spiral phase plate on fused silica by laser-induced microplasma // *Appl. Phys. B.* 2020. Vol. 126, N 4. P. 1—6.
27. *Hopp B.* et al. Comparative study of different indirect laser-based methods developed for microprocessing of transparent materials // *J. Laser Micro Nanoeng.* 2010. Vol. 5, N 1. P. 80—85.
28. *Lorenz P., Ehrhardt M., Zimmer K.* Laser-induced front side and back side etching of fused silica with KrF and XeF excimer lasers using metallic absorber layers: A comparison // *Appl. Surf. Sci.* 2012. Vol. 258, N 24. P. 9742—9746.
29. *Hanada Y.* et al. Development of practical system for laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) for micromachining of glass materials // *Appl. Phys. A.* 2004. Vol. 79, N 4. P. 1001—1003.
30. *Lorenz P., Ehrhardt M., Zimmer K.* Laser-induced front side etching: an easy and fast method for sub- μm structuring of dielectrics // *Phys. Procedia.* 2012. Vol. 39. P. 542—547.
31. *Zhang J., Sugioka K., Midorikawa K.* Laser-induced plasma-assisted ablation of fused quartz using the fourth harmonic of a Nd⁺: YAG laser // *Appl. Phys. A.* 1998. Vol. 67, N 5. P. 545—549.
32. *Hopp B.* et al. Laser-induced backside dry and wet etching of transparent materials using solid and molten tin as absorbers // *Appl. Phys. A.* 2009. Vol. 94, N 4. P. 899—904.
33. *Блонский И. В.* и др. Влияние поперечного размера факела лазерно-индуцированной плазмы на процессы обработки материалов // *Журнал технической физики.* 2005. Т. 75, № 3. С. 74—80.
34. *Veiko V. P.* et al. Two-phase mechanism of laser-induced removal of thin absorbing films. I. Theory // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1980. Vol. 13 (8). N 1565.
35. *Koval V. V.* et al. Changes in the spectral characteristics of quartz-glass plates when they are processed with laser-induced plasma // *J. Opt. Technol.* 2017. Vol. 84, N 7. P. 447—452.
36. *Cheng Y., Sugioka K., Midorikawa K.* Integration of 3D micro-optics and microfluidics in a glass chip using a femtosecond laser for photonic applications // *Proc. SPIE.* 2005. Vol. 5627. P. 247—257.
37. *Kostyuk G. K.* et al. Multisector binary phase plates on fused silica for generation of optical vortex beams superposition: Fabrication, characterization, and applications // *Opt. Laser. Technol.* 2022. Vol. 152. P. 108161.
38. *Khonina S. N.* Simple phase optical elements for narrowing of a focal spot in high-numerical-aperture conditions // *Opt. Eng.* 2013. Vol. 52, N 9. P. 091711.
39. *Rubano A.* et al. Q-plate technology: a progress review // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2019. Vol. 36, N 5. P. D70—D87.
40. *Cardano F.* et al. Polarization pattern of vector vortex beams generated by q-plates with different topological charges // *Appl. Opt.* 2012. Vol. 51. P. C1—C6.
41. *Beresna M.* et al. Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 98, N 20. P. 201101.
42. *Zhou J.* et al. Spin-dependent manipulating of vector beams by tailoring polarization // *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6, N 1. P. 1—9.
43. *Qi J.* et al. Concise and efficient direct-view generation of arbitrary cylindrical vector beams by a vortex half-wave plate // *Photonics Res.* 2021. Vol. 9, N 5. P. 803—813.
44. *Ahamed M. J., Senkal D., Shkel A. M.* Effect of annealing on mechanical quality factor of fused quartz hemispherical resonator // *Proc. IEEE ISISS.* 2014. P. 1—4.
45. *Wang Y., Shkel A. M.* Study on surface roughness improvement of Fused Quartz after thermal and chemical post-processing // *Proc. IEEE ISISS.* 2016. P. 101—104.
46. *Ahamed M. J., Senkal D., Shkel A. M.* Improvement of side-wall roughness in deep glass etched MEMS vibratory sensors // *Proc. IEEE ISISS.* 2014. P. 1—2.

	<i>Сведения об авторах</i>
Галина Кирилловна Костюк	— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; научный сотрудник; E-mail: gkkostiuk@itmo.ru
Дмитрий Сергеевич Степанюк	— Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; лаборант; E-mail: dmitriy.stepanyuk.234@mail.ru
Виктория Александровна Шкуратова	— магистр; Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; E-mail: shkuratova_va@mail.ru
Андрей Анатольевич Петров	— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; старший преподаватель; E-mail: aapetrov@itmo.ru
Никита Алексеевич Нестеров	— Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; E-mail: nkt.nesterov@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2022; одобрена после рецензирования 11.07.2022; принята к публикации 31.08.2022.

REFERENCES

- Hnatovsky C. et al. *Opt. Lett.*, 2012, no. 2(37), pp. 226–228.
- Syubaev S. et al. *Opt. Express.*, 2017, no. 9(25), pp. 10214–10223.
- Chen M. et al. *Opt. Lett.*, 2013, no. 22(38), pp. 4919–4922.
- Ng J., Lin Z., Chan C.T. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, no. 10(104), pp. 103601.
- Wang J. et al. *Nat. Photonics.*, 2012, no. 7(6), pp. 488–496.
- Nagali E. et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, no. 1(103), pp. 013601.
- Massari M. et al. *Appl. Opt.*, 2015, no. 13(54), pp. 4077–4083.
- Cheong W. C. et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, no. 23(85), pp. 5784–5786.
- Ruffato G. et al. *Opt. Eng.*, 2015, no. 11(54), pp. 111307.
- Ruffato G. et al. *Opt. Lett.*, 2014, no. 17(39), pp. 5094–5097.
- Shi L. et al. *Opt. Express.*, 2015, no. 7(23), pp. 8620–8629.
- Sueda K. et al. *Opt. Express.*, 2004, no. 15(12), pp. 3548–3553.
- Jun C. et al. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, no. 1(26), pp. 014202.
- Khonina S. N. et al. *Sci. Rep.*, 2018, no. 1(8), pp. 1–11.
- Brasselet E. et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, no. 21(97), pp. 211108.
- Zukauskas A. et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, no. 18(103), pp. 181122.
- Veiko V.P. et al. *Quantum Electron.*, 2017, no. 9(47), pp. 842–848.
- Zhang J., Sugioka K., Midorikawa K. *Appl. Phys. A*, 1998, no. 4(67), pp. 499–501.
- Cheng J.-Y. et al. *J. Micromech. Microeng.*, 2005, no. 6(15), pp. 1147–1156.
- Harm W. et al. *Opt. Express.*, 2015, no. 1(23), pp. 413–421.
- Ovsianikov A. et al. *ACS Nano*, 2008, no. 11(2), pp. 2257–2262.
- Malinauskas M. et al. *Opt. Express.*, 2010, no. 10(18), pp. 10209–10221.
- Zhou L. et al. *High Power Laser Sci.*, 2018, no. e6(6), DOI:10.1017/hpl.2018.1
- Kostyuk G. K. et al. *Opt. Lasers Eng.*, 2015, vol. 68, pp. 16–24.
- Kostyuk G.K. et al. *Opt. Lasers Eng.*, 2017, vol. 92, pp. 63–69.
- Shkumatova V. et al. *Appl. Phys. B*, 2020, no. 4(126), pp. 1–6.
- Hopp B. et al. *J. Laser Micro Nanoeng.*, 2010, no. 1(5), pp. 80–85.
- Lorenz P., Ehrhardt M., Zimmer K. *Appl. Surf. Sci.*, 2012, no. 24(258), pp. 9742–9746.
- Hanada Y. et al. *Appl. Phys. A*, 2004, no. 4(79), pp. 1001–1003.
- Lorenz P., Ehrhardt M., Zimmer K. *Phys. Procedia*, 2012, vol. 39, pp. 542–547.
- Zhang J., Sugioka K., Midorikawa K. *Appl. Phys. A*, 1998, no. 5(67), pp. 545–549.
- Hopp B. et al. *Appl. Phys. A*, 2009, no. 4(94), pp. 899–904.
- Blonsky I.V., Danko A.Y., Kadan V.N., Orieshko E.V., Puzikov V.M. *Technical Physics*, 2005, no. 3(75), pp. 358–363.
- Veiko V. P. et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1980, no. 8(13), pp. 1565.
- Koval V. V. et al. *J. Opt. Technol.*, 2017, no. 7(84), pp. 447–452.
- Cheng Y., Sugioka K., Midorikawa K. *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5627, pp. 247–257.
- Kostyuk G. K. et al. *Opt. Laser Technol.*, 2022, vol. 152, pp. 108161.
- Khonina S.N. *Opt. Eng.*, 2013, no. 9 (52), pp. 091711.
- Rubano A. et al. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2019, no. 5(36), pp. D70–D87.
- Cardano F. et al. *Appl. Opt.*, 2012, vol. 51, pp. C1–C6.
- Beresna M. et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, no. 20(98), pp. 201101.
- Zhou J. et al. *Sci. Rep.*, 2016, no. 1(6), pp. 1–9.
- Qi J. et al. *Photonics Res.*, 2021, no. 5(9), pp. 803–813.
- Ahamed M.J., Senkal D., Shkel A.M. *Proc. IEEE ISISS*, 2014, pp. 1–4.
- Wang Y., Shkel A.M. *Proc. IEEE ISISS*, 2016, pp. 101–104.
- Ahamed M.J., Senkal D., Shkel A.M. *Proc. IEEE ISISS*, 2014, pp. 1–2.

Data on authors

- Galina K. Kostyuk** — PhD; ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; Research Fellow;
E-mail: gkkostiuk@itmo.ru
- Dmitriy S. Stepanyuk** — ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; Laboratory Assistant;
E-mail: dmitriy.stepanyuk.234@mail.ru
- Victoria A. Shkuratova** — MSc; ITMO University, Faculty of Nanoelectronics;
E-mail: shkuratova_va@mail.ru
- Andrey A. Petrov** — PhD; ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; Senior Lecturer;
E-mail: aapetrov@itmo.ru
- Nikita A. Nesterov** — ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; E-mail: nkt.nesterov@mail.ru

Received 15.06.2022; approved after reviewing 11.07.2022; accepted for publication 31.08.2022.

**ОЦЕНКА ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ДВУХ РУПОРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ,
ВОЗБУЖДАЕМЫХ МОЩНЫМИ ШИРОКОПОЛОСНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ В X-ДИАПАЗОНЕ**

О. А. СКОРОБОГАТОВА

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

Аннотация. Предложена методика численного оценивания взаимного влияния двух соприкасающихся рупорных излучателей, возбуждаемых мощными широкополосными импульсами в X-диапазоне. Методика базируется на положениях геометрической теории дифракции и теории антенных решеток, она включает численное решение задачи дифракции цилиндрической волны на выпуклой двугранной импедансной клиновидной структуре при возбуждении ее негармоническим импульсом. Излучаемое поле представлено в виде суперпозиции падающего, отраженного, преломленного и дифракционного полей. При таком подходе учет широкополосности возбуждаемого сигнала заключается в представлении спектра излучаемого поля в рассматриваемой области проведением спектра возбуждаемого негармонического сигнала на пространственно-частотную характеристику импедансной клиновидной структуры. Важное преимущество предложенной методики заключается в том, что точность расчета пространственно-частотной характеристики определяется точностью асимптотического решения задачи дифракции на клине для гармонического случая и выбором числа точек дискретизации. Установлено, что вид пространственно-частотной характеристики клиновидной структуры определяется ее электрофизическими и геометрическими параметрами, направлением возбуждения и наблюдения, он оказывает влияние на характеристики и параметры возбуждаемого импульса; при этом высокочастотные составляющие спектра подвергаются большему подавлению, по сравнению с низкочастотными, приводя к изменению его амплитуды и увеличению длительности, что в конечном итоге влияет на эффективность передаваемой мощности.

Ключевые слова: *рупорный излучатель, широкополосный сигнал, матрица рассеяния, коэффициент отражения, дифракция краевых волн, импедансный клин, пространственно-частотная характеристика клина*

Ссылка для цитирования: Скоробогатова О. А. Оценка взаимного влияния двух рупорных излучателей, возбуждаемых мощными широкополосными импульсами в X-диапазоне // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 10. С. 763—774. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-763-774.

**ASSESSMENT OF THE MUTUAL INFLUENCE OF TWO HORN EMITTERS EXCITED
BY POWERFUL BROADBAND PULSES IN THE X-BAND**

O. A. Skorobogatova

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

Abstract. A technique for numerical estimation of the mutual influence of two contiguous horn emitters excited by powerful broadband pulses in the X-band is proposed. The technique is based on the provisions of the geometric theory of diffraction and the theory of antenna arrays, it includes a numerical solution of the problem of diffraction of a cylindrical wave on a convex dihedral impedance wedge-shaped structure when excited by a non-harmonic pulse. The radiated field is represented as a superposition of incident, reflected, refracted and diffraction fields. With this approach, the consideration of the broadband of the excited signal consists in representing the spectrum of the radiated field in the region under consideration by the product of the spectrum of the excited inharmonic signal on the spatial frequency characteristic of the impedance wedge-shaped structure. An important advantage of the proposed technique is that the accuracy of calculating the spatial frequency response is determined by the accuracy of the asymptotic solution of the wedge diffraction problem for the harmonic case and the choice of the number of sampling points. It is established that the type of spatial-frequency characteristic of a wedge-shaped structure is determined by its electrophysical and geometric parameters, the direction of excitation and observation, and it affects the characteristics and parameters of the excited pulse; at the same time, the high-frequency components of the spectrum are subjected to greater suppression compared to low-frequency ones, leading to a change in its amplitude and an increase in duration, which ultimately affects the efficiency of the transmitted power.

Keywords: feedhorn, broadband signal, scattering matrix, reflection coefficient, edge wave diffraction, impedance wedge, spatial-frequency characteristic of wedge

For citation: Skorobogatova O. A. Assessment of the mutual influence of two horn emitters excited by powerful broadband pulses in the X-band. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 10. P. 763—774 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-763-774.

Введение. Для современных бортовых специализированных радиолокационных комплексов X-диапазона, работающих в широкой полосе частот, требуются малогабаритные антенные системы с коэффициентом перекрытия по частоте (отношение максимальной рабочей частоты к минимальной) до нескольких десятков [1, 2]. Примеры расчета различных модификаций данных антенн широко представлены в российских и зарубежных научных изданиях, например, в [3—7]. Анализ научной литературы показал, что при разработке антенных систем X-диапазона, возбуждаемых мощными широкополосными сигналами, наиболее эффективно применение конструкций рупорных излучателей, работающих на основе T-волн. Однако разработчики антенн сталкиваются с проблемой: при возбуждении близко расположенных излучателей (на расстоянии, меньшем половины длины волны излучения) мощными широкополосными импульсами регистрируется взаимное влияние излучающих элементов, вносящее искажение в диаграммы направленности соседних излучателей, возникает импедансное рассогласование с линией передачи, что приводит к снижению коэффициента полезного действия системы в целом. Экспериментальные и теоретические исследования доказывают, что взаимным влиянием соседних излучающих элементов пренебрегать нельзя. Следовательно, при проектировании рупорных антенных систем X-диапазона, возбуждаемых мощными широкополосными импульсами, необходимо уметь численно оценивать взаимное влияние близко расположенных излучающих элементов.

Постановка задачи. Поставленную научную задачу оценивания взаимного влияния двух рупорных излучателей предлагается решить на основе теоретических положений геометрической теории дифракции (ГТД) краевых электромагнитных волн (ЭМВ) и теории антенных решеток [5, 8]. Главной особенностью такого подхода к оценке взаимного влияния соседних излучателей при возбуждении мощными широкополосными импульсами является аналитический расчет частотной характеристики заданной электродинамической структуры при возбуждении ее негармоническим колебанием, когда спектр излучаемого поля в рассматриваемой области представляет собой произведение спектра „начальной“ функции на пространственно-частотную характеристику рассматриваемой системы.

Пусть два идентичных рупорных излучателя представляют собой синхронизированную систему, работающую в X-диапазоне. Характерные примеры рупорных излучателей X-диапазона приведены в статье [4]. Для решения поставленной задачи выберем электродинамическую модель в виде двух соприкасающихся модифицированных гребенчатых пирамидальных рупоров с пятью металлическими решетками вместо боковых стенок, находящихся в ближнем поле излучения друг друга (рис. 1). Выбранная модификация излучателя, построенная на основе гребенчатого волновода, обладает пропускной способностью по частоте 18:1 [7]. Грани соседних соприкасающихся рупорных излучателей образуют выпуклую двугранную клиновидную структуру с импедансными свойствами (рис. 2).

Эскизное проектирование выполнено в среде CST Microwave Studio [9]. Волновое сопротивление порта излучателя равно 50 Ом. Каждый отдельный излучатель согласован со своей питающей линией.

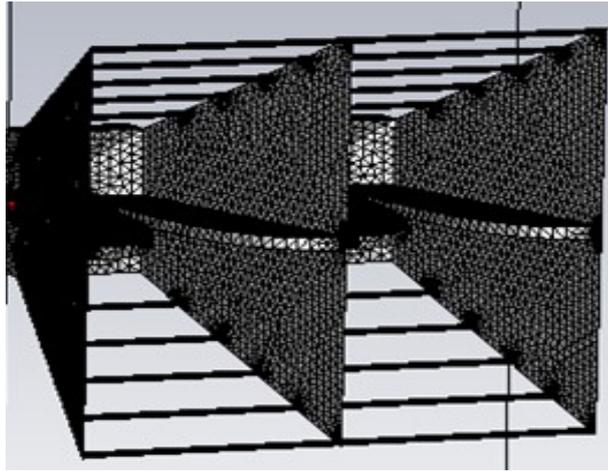


Рис. 1

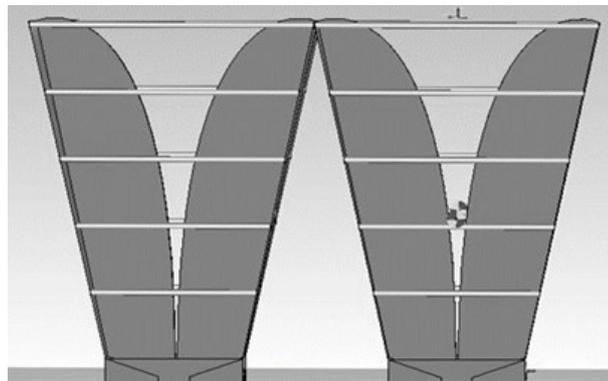


Рис. 2

Из теории антенных решеток известно, что взаимное влияние соседних излучающих элементов приводит к изменению входного импеданса и коэффициента отражения излучателя, обусловленных близостью элементов друг к другу. Взаимный импеданс Z_{ij} между i -м и j -м излучающими элементами можно вычислить на основе решения системы уравнений [5]:

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}_{ij}\mathbf{I}, \quad (1)$$

где \mathbf{I} — матрица возбуждаемых токов на входах излучателей антенной системы (А); \mathbf{V} — матрица напряжений на входах излучателей антенной системы (В); \mathbf{Z}_{ij} — матрица собственных и взаимных нормированных сопротивлений.

При импедансном подходе поставленную задачу можно решить на основе теории многополюсников с помощью матрицы рассеяния антенной системы [10]:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha} & \mathbf{S}_{\alpha\beta} \\ \mathbf{S}_{\beta\alpha} & \mathbf{S}_{\beta\beta} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $\mathbf{S}_{\alpha\alpha}$ — квадратная матрица, определяющая передачу мощности между входами соседних излучателей; $\mathbf{S}_{\alpha\beta}$ — квадратная матрица, описывающая работу антенной системы на прием; $\mathbf{S}_{\beta\alpha}$ — квадратная матрица излученного поля, выраженная через возбуждающие распределения поля соседних элементов антенной системы; $\mathbf{S}_{\beta\beta}$ — квадратная матрица, определяющая отраженное поле от согласованной нагрузки при падении сферической волны из дальней зоны.

Данные квадратные матрицы можно вычислить на основе следующей системы уравнений [10]:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{S}_{\alpha\alpha} &= (\mathbf{Z} - \mathbf{E}) \cdot (\mathbf{Z} + \mathbf{E})^{-1}, \\ \mathbf{S}_{\alpha\beta} &= 2(\mathbf{Z} + \mathbf{E})^{-1} \cdot (\mathbf{I}^T)^{-1} = (\mathbf{E} - \mathbf{S}_{\alpha\alpha}) \cdot (\mathbf{I}^T)^{-1}, \\ \mathbf{S}_{\beta\alpha} &= 2(\mathbf{I}^{-1}) \cdot (\mathbf{Z} + \mathbf{E})^{-1} = (\mathbf{I}^{-1}) \cdot (\mathbf{E} - \mathbf{S}_{\alpha\alpha}), \\ \mathbf{S}_{\beta\beta} &= -(\mathbf{I}^T)^* \cdot (\mathbf{Z}^* - \mathbf{E}) \cdot (\mathbf{Z} + \mathbf{E})^{-1} \cdot (\mathbf{I}^T)^{-1}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где \mathbf{E} — единичная квадратная матрица; \mathbf{I}^T — транспонированная матрица возбуждаемых токов; $(\mathbf{I})^{-1}$ — обратная матрица возбуждаемых токов; звездочкой обозначена операция комплексного сопряжения всех элементов матрицы.

Тогда в режиме излучения коэффициент связи по мощности между двумя излучателями будет равен:

$$\dot{P}_2 / \dot{P}_1 = Z_{12}^2 / 4Z_{11}^2, \quad (4)$$

где \dot{P}_2 — мощность, „проникающая“ во второй излучатель; \dot{P}_1 — мощность, излучаемая первым излучателем.

Для определения излучаемой и „проникающей“ в соседний излучатель мощностей необходимо рассчитать поле дифракции цилиндрической волны от заданной электродинамической структуры, представленной в виде выпуклой двугранной клиновидной структуры с импедансными свойствами (см. рис. 2), при возбуждении ее негармоническим колебанием. С учетом теоретических положений ГТД возбуждаемые краевые волны, „проникающие“ во второй излучатель, находятся из решения задачи дифракции от кромки в виде суперпозиции падающего, отраженного, преломленного и дифракционного полей лучевого типа, удовлетворяющих принципу Ферма. Задача является векторной, распадается на две скалярные для Н-поляризованного (когда вектор магнитного поля параллелен кромке клина) и Е-поляризованного (когда вектор электрического поля параллелен кромке клина) случаев.

Расчет поля дифракции цилиндрической волны на выпуклой двугранной импедансной клиновидной структуре при возбуждении негармоническим колебанием. Импедансная клиновидная структура, образованная гранями соседних рупорных излучателей длиной L , возбуждается цилиндрической электромагнитной волной X -диапазона. Введем связанную с объектом цилиндрическую систему координат (r, φ, z) , когда ось OZ совпадает с кромкой клиновидной структуры. Положение граней описывается уравнениями $\varphi = \pm\Phi$. Расстояние от источника поля до кромки $r_0 = L$, при этом полярный угол может изменяться в пределах $|\varphi_0| \leq \Phi$. Точка наблюдения имеет координаты (r, φ) , при $|\varphi_0 - \varphi| > \pi$ она находится в области тени. Величина импедансной характеристики задана введением комплексного параметра $v_{\pm}^{H,E} = \xi'_{\pm} \mp i\xi''_{\pm}$ ($\xi''_{\pm} \geq 0$), который связан с волновыми сопротивлениями через соотношения: $\sin v_{\pm}^E = Z_0 / Z_{\pm}$ (для продольного электрического поля) и $\sin v_{\pm}^H = Z_{\pm} / Z_0$ (для продольного магнитного поля), где Z_0 — волновое сопротивление среды свободного пространства; Z_{\pm} — поверхностные импедансы граней. Здесь и далее подразумевается, что зависимость от времени определяется множителем $\exp(j\omega t)$.

Воспользуемся методом решения задачи дифракции ЭМВ на кромке импедансного полубесконечного клина, основанным на методе Зоммерфельда—Малюжинца, разработанном профессором А. И. Сташкевичем [11]. Согласно этому методу, точное решение задачи дифракции на импедансном полубесконечном клине $\dot{r}(r, \varphi)$ в произвольной точке наблюдения (r, φ) в области $|\varphi| \leq \Phi$ для случая установившихся гармонических колебаний определяется выражением:

$$\begin{aligned} \dot{\rho}(r, \varphi) = & -i \frac{\dot{A}_0}{4\Phi} \int_c \frac{\cos \frac{\pi}{2\Phi} \left(\alpha + \begin{bmatrix} \varphi \\ \varphi_0 \end{bmatrix} \right)}{\Psi \left(\alpha + \begin{bmatrix} \varphi \\ \varphi_0 \end{bmatrix} \right)} \exp \left(ik \begin{bmatrix} r \\ r_0 \end{bmatrix} \cos \alpha \right) \times \\ & \times \int_{\gamma} \frac{\Psi \left(\beta + \begin{bmatrix} \varphi \\ \varphi_0 \end{bmatrix} \right) \exp \left(ik \begin{bmatrix} r_0 \\ r \end{bmatrix} \cos \beta \right)}{\sin \frac{\pi}{2\Phi} \left(\beta + \begin{bmatrix} \varphi \\ \varphi_0 \end{bmatrix} \right) - \sin \frac{\pi}{2\Phi} \left(\alpha + \begin{bmatrix} \varphi \\ \varphi_0 \end{bmatrix} \right)} d\alpha, \end{aligned} \quad (5)$$

где \dot{A}_0 — комплексная амплитуда напряженности поля падающей волны, возбуждающей клин; $\Psi(z)$ — некоторая специальная функция (функция Малюжинца):

$$\Psi(z) = \prod_{n=1}^{\infty} \prod_{m=1}^{\infty} \left[1 - \left[\frac{z}{2\Phi(2n-1) + 0,5\pi(2m-1)} \right]^2 \right]^{(-1)^{m+1}}. \quad (6)$$

Выражение $\dot{\rho}(r, \varphi)$ в клиновидной области $|\varphi| \leq \Phi$ должно удовлетворять однородным краевым импедансным условиям на гранях вида:

$$\frac{d\rho}{rd\varphi} \pm ik \sin \nu_{\pm} \rho = 0 \quad (\varphi = \pm\Phi). \quad (7)$$

где k — волновое число свободного пространства, $k = 2\pi/\lambda$; λ — длина волны в свободном пространстве.

Соотношение (5) вычисляется приближенными асимптотическими методами. В случае возбуждения клина цилиндрической волной, у которой магнитный вектор параллелен кромке клина, поле дифракции $\dot{\rho}(r, \varphi) = \dot{E}(r, \varphi)$ в дальней зоне целесообразно представить в виде суммы (суперпозиции) следующих типов волн [12, 13]:

$$\dot{E}(r, \varphi) = \dot{E}_{\text{пад}} + \sum \dot{E}_{\text{отр}\pm} + \dot{E}_{\text{диф}} + \dot{E}_{\text{пов}\pm} + \dot{E}_{\text{п.д}\pm}, \quad (8)$$

где $\dot{E}_{\text{пад}}$ — компонент вектора напряженности электрического поля падающей цилиндрической волны; $\sum \dot{E}_{\text{отр}\pm}$ — компонент вектора напряженности электрического поля цилиндрических волн, отраженных или переотраженных импедансными гранями клина; $\dot{E}_{\text{диф}}$ — компонент вектора напряженности электрического поля цилиндрической волны, возбуждаемой и рассеянной в пространстве кромкой клина; $\dot{E}_{\text{пов}\pm}$ — компонент вектора напряженности электрического поля поверхностных волн, распространяющихся продольно импедансным граням, возбуждаемый непосредственно источником поля; $\dot{E}_{\text{п.д}\pm}$ — компонент вектора напряженности электрического поля поверхностных волн, возникающий вследствие их дифракции (рассеяния) на кромке клина.

Возможные типы волн, образующиеся в результате дифракции на импедансной клиновидной структуре, представлены на рис. 3. Условие возникновения того или иного типа волн определяется геометрическими и радиофизическими свойствами рупорных излучателей.

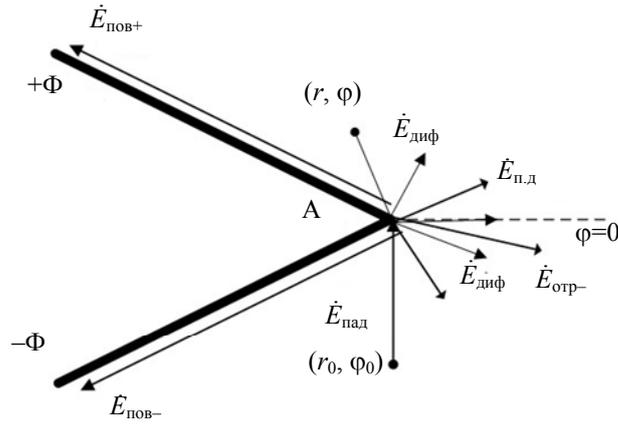


Рис. 3

Рассмотрим основные случаи взаимного расположения источника поля и точки наблюдения в окрестности выпуклого двугранного импедансного клина (рис. 4). Положение источника определяется координатами (r_0, φ_0) , а положение точки наблюдения обозначены координатами: (r_1, φ_1) , (r_2, φ_2) , (r_3, φ_3) .

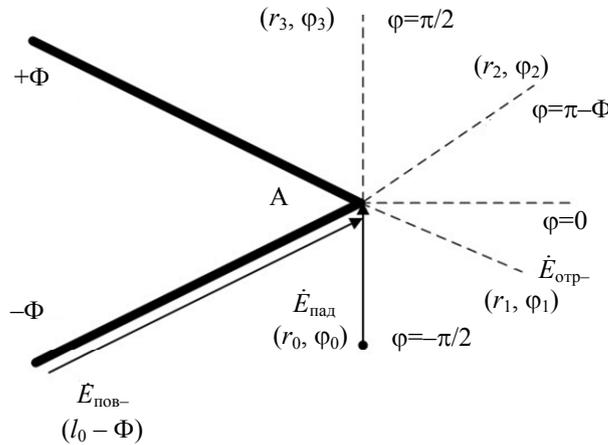


Рис. 4

Угловые координаты указанных точек удовлетворяют условиям:

$$\begin{aligned} |\varphi_0 - \Phi| < 0,5\pi; \\ -\varphi_0 - \varphi_1 + 2\Phi = -\pi; \\ \varphi_2 = \pi - \Phi; \\ \varphi_3 = \pi + \varphi_0. \end{aligned}$$

Точка наблюдения с координатами (r_1, φ_1) является точкой „предельного отражения“, а с координатами (r_3, φ_3) — точкой, расположенной на границе области „свет—тьнь“ падающей волны. Когда источник поля определяется положением $(l_0, -\Phi)$, т.е. принадлежит импедансной грани $\varphi = -\Phi$, точка наблюдения с координатами (r_2, φ_2) лежит на продолжение этой границы.

При учете взаимного влияния двух излучателей, когда точка наблюдения находится в секторе $\varphi_3 \leq \varphi \leq +\Phi$, поле дифракции в окрестности кромки клина можно записать в виде

$$\dot{E}(r, \varphi) = \dot{E}_{пад}^\pi + \dot{E}_{диф} + \dot{E}_{п.д}(-\Phi) + \dot{E}_{пов+}, \tag{9}$$

если $\varphi_1 \leq \varphi \leq \Phi$:

$$\dot{E}(r, \varphi) = \dot{E}_{\text{пад}}^{\pi} + \dot{E}_{\text{отр}}^{(\pm\pi)} + \dot{E}_{\text{диф}} + \dot{E}_{\text{п.д}}(-\Phi) + \dot{E}_{\text{пов.}}. \quad (10)$$

В выражениях (9) и (10) падающая цилиндрическая волна на границе „свет—тень“ рассчитывается на основе следующего выражения:

$$\dot{E}_{\text{пад}}^{\pi}(r_0, \varphi_0) = \dot{E}_{\text{пад}}^{c-m} = 0,5k\dot{A}_0 \sqrt{\frac{2\pi}{kr}} \exp i(k(r+r_0) - 0,25\pi); \quad (11)$$

отраженная цилиндрическая волна:

$$\dot{E}_{\text{отр}}^{(\pm\pi)} = \dot{E}_{\text{отр}}^{\text{пр}} = 0,5k\dot{A}_0 \frac{\Psi(\pm\pi + \varphi_0)}{\Psi(\varphi)} \sqrt{\frac{2\pi}{kr}} \cdot \exp(ik(r+r_0) - 0,25\pi). \quad (12)$$

Компоненты напряженности электрического поля, возникающие вследствие дифракции (рассеяния) на кромке, рассчитываются по формулам:

$$\dot{E}_{\text{диф}} = \frac{k\dot{A}_0}{2\Phi} \frac{\pi}{\sqrt{kr}\sqrt{kr_0}} D(\varphi_0, \varphi, v_{\pm}^E) \exp ik(r+r_0); \quad (13)$$

$$\dot{E}_{\text{п.д}} = \pm \frac{k\dot{A}_0\pi}{4\Phi} \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{kr}} \Psi_1\Psi_2 \exp\left(ik\left(r+r_0\cos(\varphi_0 + \Phi + v_{\pm}^E)\right) - 0,25\pi\right); \quad (14)$$

$$\Psi_1 = \frac{\cos\frac{\pi\varphi}{4\Phi} \cos\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + v_{+}^E + v_{-}^E) \cos\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + 2\Phi)}{\Psi(\varphi) \sin\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + \Phi + v_{-}^E + \varphi) \Psi_{\Phi}(0,5\pi + 2\Phi)}; \quad (15)$$

$$\Psi_2 = \frac{\Psi_{\Phi}(0,5\pi + 2\Phi + 2v_{-}^E) \Psi_{\Phi}(-1,5\pi + v_{+}^E - v_{-}^E)}{\cos\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + \Phi + v_{-}^E - \varphi) \Psi_{\Phi}(1,5\pi + v_{+}^E + v_{-}^E)}. \quad (16)$$

Коэффициент дифракции $D(\varphi_0, \varphi, v_{\pm}^E)$, входящий в выражение (15), определяется по формуле:

$$D(\varphi_0, \varphi, v_{\pm}^E) = \frac{\cos\frac{\pi\varphi}{2\Phi}}{\Psi(\varphi)} \left[\frac{\Psi(-\pi + \varphi_0)}{\sin\frac{\pi}{4\Phi}(-\pi + \varphi_0 - \varphi) \cos\frac{\pi}{4\Phi}(-\pi + \varphi_0 - \varphi)} - \frac{\Psi(\pi + \varphi_0)}{\sin\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + \varphi_0 - \varphi) \cos\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + \varphi_0 + \varphi)} \right]. \quad (17)$$

Для учета широкополосности возбуждаемого сигнала введем частотную характеристику импедансной клиновидной структуры. С этой целью воспользуемся разработанным Н. В. Зерновым [14, 15] частотно-временным методом, согласно которому падающая волна представляет собой совокупность бесчисленного множества синусоидальных волн, при этом дифракционное поле в соответствии с принципом суперпозиции можно рассматривать как совокупный отклик на элементарные воздействия:

$$d\rho_g = \frac{1}{\pi} \dot{F}(i\omega) \rho_g(\omega, r, \varphi) \exp(i\omega t) d\omega, \quad (18)$$

где $\rho_g(\omega, r, \varphi)$ — комплексные амплитуды векторов поля дифракции на клиновидной структуре в режиме установившихся гармонических колебаний с частотой ω ; $\dot{F}(\omega)$ — спектральная плотность возбуждаемого негармонического сигнала на частоте ω :

$$\dot{F}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \exp(-i\omega t) dt, \quad (19)$$

где $S(t)$ — функция, отражающая закон изменения излучающего поля во времени.

Тогда искомое поле дифракции можно рассчитать по формуле:

$$\rho_g(r, \varphi, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{F}(i\omega) \rho_g(\omega, r, \varphi) \exp(i\omega t) d\omega. \quad (20)$$

Таким образом, рассчитать поле дифракции на импедансной клиновидной структуре, образованной гранями соседних рупорных излучателей, для случая негармонического импульса можно следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{E}(r, \varphi, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{F}(i\omega) [& \dot{E}_{\text{пад}} + \sum \dot{E}_{\text{отр}\pm} + \dot{E}_{\text{диф}} + \\ & + \dot{E}_{\text{пов}\pm} + \dot{E}_{\text{п.д}\pm}] \exp(i\omega t) d\omega. \end{aligned} \quad (21)$$

Точность расчета частотной характеристики определяется точностью асимптотического решения задачи дифракции на клине для гармонического случая и выбором числа точек дискретизации.

Оценка взаимного влияния двух соприкасающихся рупорных излучателей, возбуждаемых мощными широкополосными импульсами в X -диапазоне. Оценивание взаимного влияния двух соприкасающихся рупорных излучателей, возбуждаемых мощными широкополосными импульсами в X -диапазоне, проводится по следующей методике.

На первом этапе задаются характеристики импульса (законы модуляции и поляризации, его амплитуда и длительность), параллельно этому выбираются параметры импедансного клина (угол раскрытия, направления облучения и наблюдения, значения электрических характеристик граней клина).

На втором этапе на основе преобразования Фурье по формуле (19) рассчитывается спектральная плотность возбуждаемого негармонического сигнала $\dot{F}(\omega) = F[U(t)]$. Далее по формулам (9)—(17) определяется функциональная зависимость напряженности поля от частоты и угла наблюдения для случая гармонического колебания $\dot{\rho}_g(\omega, r, \varphi)$ во всем частотном диапазоне. Число точек дискретизации выбирается из расчета обеспечения требуемой точности вычислений (0,5—1 %).

На третьем этапе на основе обратного преобразования Фурье по формуле (21) рассчитывается комплексная пространственно-частотная характеристика (ПЧХ) клиновидной структуры в заданной полосе частот.

На последнем этапе рассчитываются коэффициенты матрицы рассеяния антенной системы.

В соответствии с предлагаемой методикой получены следующие результаты численного моделирования. Установлено, что вид ПЧХ рассматриваемой системы определяется ее электрофизическими и геометрическими параметрами, а также направлениями возбуждения и наблюдения. Из рис. 5 видно, что высокочастотные составляющие спектра подвергаются большему подавлению по сравнению с низкочастотными. Очевидно, это приведет к уменьшению амплитуды и увеличению длительности возбуждаемого импульса, а также искажению его формы.

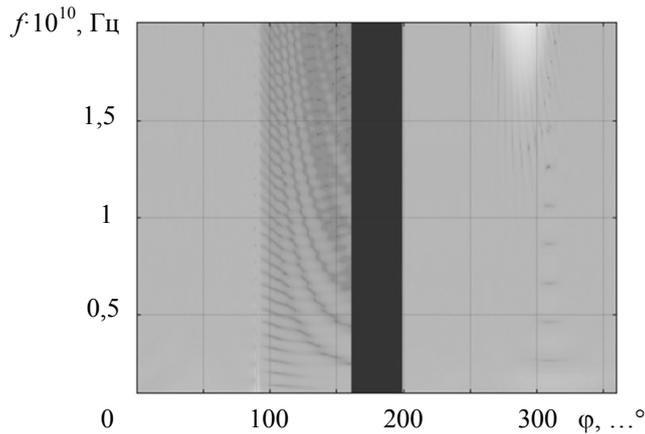


Рис. 5

Показано, что амплитудная диаграмма поля дифракции в окрестности кромки клина имеет осциллирующий характер, что вызвано интерференцией полей: $\dot{E}_{\text{пад}} + \sum \dot{E}_{\text{отр}\pm} + \dot{E}_{\text{диф}}$ (рис. 6).

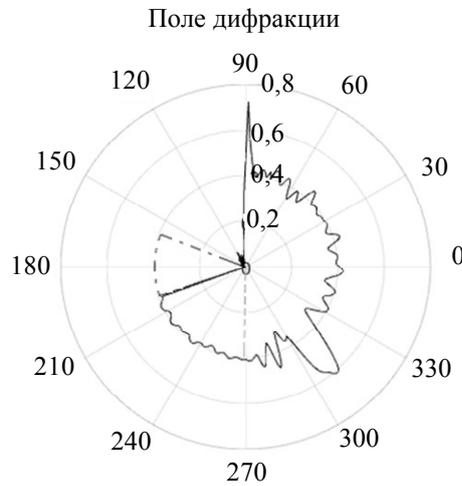


Рис. 6

Напряженность поля в области геометрической тени ($\varphi_3 \leq \varphi \leq \Phi$) объясняется вкладом дифракционных компонентов электрического поля: $\dot{E}_{\text{здиф}}$ и $\dot{E}_{\text{пов_диф}}$, амплитуда которых пропорциональна $1/(\sqrt{r}\sqrt{r_0})$ ($1/\sqrt{r}$), при этом граница „свет—тень“ выражена достаточно резко (рис. 7).

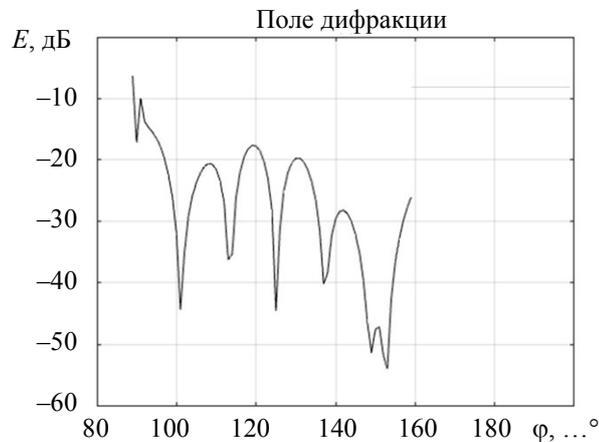


Рис. 7

Расчетное нормированное значение поля, „затекающего“ в соседний излучатель, в заданном частотном диапазоне составило до 0,1 (–20 дБ) от значений падающего поля и до 0,4 (–8 дБ) для возвратной волны, что совпадает с результатами расчета соответствующих коэффициентов отражения по напряжению. В соответствии с выражением (4) коэффициент связи по мощности между двумя излучателями в режиме излучения составил –21,6 дБ.

Результаты электродинамического моделирования коэффициента отражения с учетом и без учета взаимного влияния приведены на рис. 8 и 9 соответственно. На рис. 10 представлена зависимость входного импеданса от частоты. Приведенные графики подтверждают правомерность использования предложенной методики при оценке взаимного влияния двух соприкасающихся рупорных излучателей, возбуждаемых мощными широкополосными импульсами в X-диапазоне.

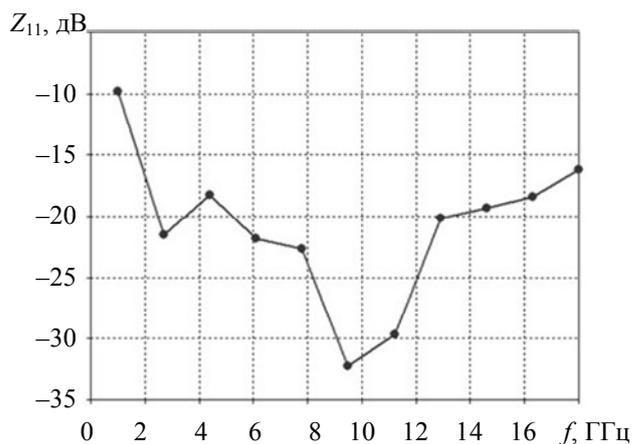


Рис. 8

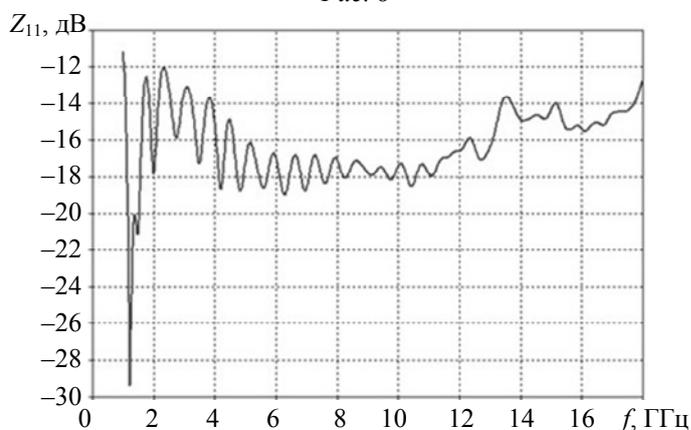


Рис. 9

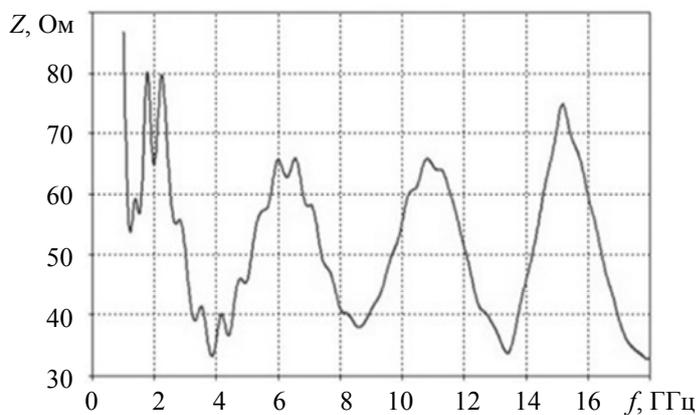


Рис. 10

Заключение. Взаимное влияние двух соприкасающихся рупорных излучателей, возбуждаемых мощными широкополосными импульсами в X -диапазоне, оценено на основе электродинамического подхода. Оценка получена численным решением задачи дифракции цилиндрической волны на выпуклой двугранной импедансной клиновидной структуре при возбуждении ее негармоническим импульсом, при этом учет широкополосности возбуждаемого сигнала заключается в представлении спектра излучаемого поля в рассматриваемой области произведением спектра возбуждаемого негармонического сигнала на ПЧХ импедансной клиновидной структуры. Важное преимущество предложенного решения — точность расчета ПЧХ определяется точностью асимптотического решения задачи дифракции на клине для гармонического случая и выбором числа точек дискретизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов А. Г., Каменев А. Г., Корнеев С. А., Чистюхин В. В. Принципы проектирования бортовых многолучевых приемных АФАР систем спутниковой связи // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25, № 1. С. 73—78. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-73-78.
2. Овчинникова Е. В., Гаджиев Э. В. и др. Особенности построения бортовых антенных решеток космических аппаратов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2018. № 3. С. 66—76.
3. Мещеряков В. В., Маркова Н. В., Юрманов П. Д. Моделирование и практическая реализация широкополосной двухгребневой рупорной антенны с шириной рабочей полосы более октавы и высоким уровнем кроссполаризационной развязки // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 42—51. DOI: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-42-51.
4. Куроптеев П. Д., Леваков В. В., Фатеев А. В. Широкополосная рупорная антенна диапазона 0,8–30 ГГц // Докл. ТУСУР. 2016. Т. 19, № 2. С. 23—27.
5. Hansen R. C. Phased Array Antennas. 2nd ed. Wiley series in microwave and optical engineering. Texas A&M University, 2009. 571 p.
6. Volakis J. Antenna Engineering Handbook. McGraw-Hill, 2007. 1755 p.
7. Bruns C., Leuchtmann P., Vahldieck R. Analysis and Simulation of a 1–18 GHz Broadband Double-Ridged Horn Antenna // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2003. Vol. 45, N 1. P. 55—60.
8. Боровиков В. А., Кинберг Б. Е. Геометрическая теория дифракции. М.: Связь, 1978. 248 с.
9. Курушин А. А., Пластиков А. Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. М.: Изд-во МЭИ, 2011. 155 с.
10. Сазонов Д. М. Многоэлементные антенные системы. Матричный подход. М.: Радиотехника, 2015. 144 с.
11. Бендерский Г. П., Крячко А. Ф., Сташкевич А. И., Шалдаев С. Е. Рассеяние электромагнитных волн на радиолокационных отражателях сложной формы. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2005. 480 с.
12. Скоробогатова О. А. Особенности решения задачи дифракции электромагнитных волн на конечных импедансных клиновидных структурах при определении априорной информации о радиолокационных характеристиках средств вооружения и военной техники // Тр. Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2018. Вып. 665. С. 88—97.
13. Скоробогатова О. А. Асимптотическое решение задачи дифракции плоской электромагнитной волны на цилиндрической структуре с импедансным покрытием // Тр. Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2017. Вып. 663. С. 171—177.
14. Зернов Н. В. О решении нестационарных краевых задач электродинамики // Сб. докладов Академии наук СССР. 1951. Т. LXXX, № 1. С. 33—35.
15. Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В. Электромагнитные поля и волны. М.: Сов. радио, 1971. 664 с.

Сведения об авторе

Ольга Анатольевна Скоробогатова — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, старший научный сотрудник; E-mail: vka@mil.ru

Поступила в редакцию 14.06.2022; одобрена после рецензирования 22.07.2022; принята к публикации 31.08.22.

REFERENCES

1. Efimov A.G., Kamenev A.G., Korneev S.A., Chistyukhin V.V. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektronika*, 2020, no. 1(25), pp. 73–78, DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-73-78. (in Russ.)
2. Ovchinnikova E.V., Vin Fam Van, Kondratyeva S.G., Generalov A.G., Gadzhiyev E.V., Vasilyev O.V., Kalinin T.V., Vasilyev V.D. *Radio Engineering and Telecommunication Systems*, 2018, no. 3, pp. 66–76. (in Russ.)
3. Meshcheriakov V.V., Markova N.V., Iurmanov P.D. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2019, no. 5(22), pp. 42–51, DOI: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-42-51. (in Russ.)
4. Kuroptev P.D., Levyakov V.V., Fateev A.V. *Proceedings of the TUSUR University*, 2016, no. 2(19), pp. 23–27. (in Russ.)
5. Hansen R.C. *Phased Array Antennas*, Wiley series in microwave and optical engineering, Texas A&M University, 2009, 571 p.
6. Volakis J. *Antenna Engineering Handbook*, McGraw-Hill, 2007, 1755 p.
7. Bruns C., Leuchtman P., Vahldieck R. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2003, no. 1(45), pp. 55–60.
8. Borovikov V.A., Kinberg B.E. *Geometricheskaya teoriya difraktsii* (Geometric Theory of Diffraction), Moscow, 1978, 248 p. (in Russ.)
9. Kurushin A.A., Plasticov A.N. *Proyektirovaniye SVCh ustroystv v srede CST* (Microwave Studio Designing Microwave Devices in CST Microwave Studio), Moscow, 2011, 155 p. (in Russ.)
10. Sazonov D.M. *Mnogoelementnyye antennnyye sistemy. Matrichnyy podkhod* (Multi-Element Antenna Systems. Matrix Approach), Moscow, 2015, 144 p. (in Russ.)
11. Bendersky G.P., Kryachko A.F., Stashkevich A.I., Shaldaev S.E. *Rasseyaniye elektromagnitnykh voln na radiolokatsionnykh otrazhatelyakh slozhnoy formy* (Scattering of Electromagnetic Waves on Radar Reflectors of Complex Shape), St. Petersburg, 2005, 480 p. (in Russ.)
12. Skorobogatova O.A. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2018, no. 665, pp. 88–97. (in Russ.)
13. Skorobogatova O.A. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2017, no. 663, pp. 171–177. (in Russ.)
14. Zernov N.V. *Collection of reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 1951, no. 1(LXXX), pp. 33–35. (in Russ.)
15. Goldstein L.D., Zernov N.V. *Elektromagnitnyye polya i volny* (Electromagnetic Fields and Waves), Moscow, 1971, 664 p. (in Russ.)

Data on author

Olga A. Skorobogatova — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Senior Researcher; E-mail: vka@mil.ru

Received 14.06.2022; approved after reviewing 22.07.2022; accepted for publication 31.08.22.