

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

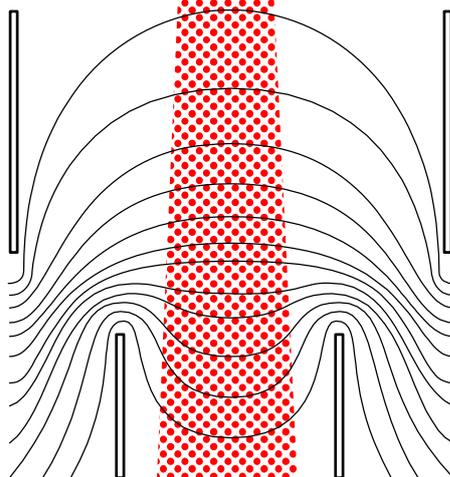
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ **10**

Т. 66
2023

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
В. В. ЕФИМОВ, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, 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
Ю. А. ЛИТВИНЕНКО, канд. техн. наук, Концерн «ЦНИИ «Электронприбор»», Санкт-Петербург, Россия
В. Д. ЛУКЬЯНОВ, 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
А. Н. МИРОНОВ, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
В. М. МУСАЛИМОВ, д-р техн. наук, проф., ИПМаш РАН, 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
В. С. СИЗИКОВ, 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
В. Ю. ТЕРТЫЧНЫЙ, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 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
В. П. ХОДУНКОВ, канд. техн. наук, ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 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 30.10.2023 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.

Требования к оформлению рукописи размещены на сайте журнала <http://pribor.itmo.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:

- информатика и информационные процессы;
- информационно-измерительные и управляющие системы;
- системный анализ, управление и обработка информации;
- приборы навигации;
- вычислительные системы и их элементы;
- оптические и оптико-электронные приборы и комплексы;
- приборы и методы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды;
- приборы, системы и изделия медицинского назначения;
- проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры;
- метрология и метрологическое обеспечение;
- компьютерное моделирование и автоматизация проектирования;
- роботы, мехатроника и робототехнические системы.

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, список литературы;
- рисунки и таблицы.

Объем текста (оформленного в соответствии с требованиями журнала — шрифт Times New Roman, размер — 14 пт, межстрочный 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. **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

ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

- Стародубцев В. Г., Четвериков Е. А. Формирование множеств троичных касами-подобных последовательностей для систем передачи цифровой информации 807
- Двойникова А. А., Кондратенко К. О. Подход к автоматическому распознаванию эмоций в транскрипциях речи..... 818

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Беспалов В. В., Ведяков А. А. Адаптивные наблюдатели для нелинейных систем на основе процедуры динамического расширения и смешивания..... 828

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Ким С. А., Пыркин А. А., Борисов О. И. Алгоритмы управления движением квадрокоптера в режиме динамического позиционирования..... 834

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

- Овчинников К. А., Криштоп В. В., Гилев Д. Г., Максименко В. А., Перминов А. В. Измерение величины двулучепреломления волокна типа Panda с помощью интерферометра Саньяка 845

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

- Алтай Е., Кузиванов Д. О., Рождественский Д. А., Санников М. И., Степанова К. А. Методы фильтрации сигналов акустической эмиссии при контроле дефектообразования в процессе прямого лазерного выращивания изделий..... 852
- Зеневич А. О., Мансуров Т. М., Коваленко Т. Г., Новиков Е. В., Жданович С. В. Идентификация жидкостей и определение концентрации водных растворов при помощи оптического волокна 869
- Лютикова М. Н., Коробейников С. М., Ридель А. В. Применение ИК-спектроскопии для контроля качества жидких диэлектриков 876
- Шаламай Л. И., Майоров Е. Е., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Спектрофотометрическое исследование образцов контрольной фиксации наполнителя к шлифу зуба стоматологическим цементом..... 887

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
EFIMOV VLADIMIR, Dr. Sci., Prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
KHODUNKOV VYACHESLAV, PhD, D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, 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
LITVINENKO YULIA, PhD, Concern CSRI Electropribor, JSC, 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
MIRONOV ANDREY, Dr. Sci., Prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
MUSALIMOV VIKTOR, Dr. Sci., Prof., IPMash RAS, 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
SIZIKOV VALERY, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
SOKOLOV BORIS, Dr. Sci., Prof., SPbFRC RAS, St. Petersburg, Russia
SOLK SERGEY, Dr. Sci., SRI OEP, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia
TERTYCHNY VLADIMIR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, 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., IPMash 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. 66

OCTOBER 2023

№ 10

CONTENTS

INFORMATICS AND INFORMATION PROCESSING

- Starodubtsev V. G., Chetverikov E. A.** Formation of Sets of Ternary Kasami-like Sequences for Digital Information Transmission Systems 807
- Dvoynikova A. A., Kondratenko K. K.** Approach to Automatic Recognition of Emotions in Speech Transcriptions 818

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL, AND INFORMATION PROCESSING

- Bespalov V. V., Vedyakov A. A.** Adaptive Observers for Nonlinear Systems Based on a Dynamic Extension and Mixing Procedure 828

ROBOTS, MECHATRONICS, AND ROBOTIC SYSTEMS

- Kim S. A., Pyrkin A. A., Borisov O. I.** Algorithms for Controlling a Quadcopter Movement in Dynamic Positioning Mode 834

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND COMPLEXES

- Ovchinnikov K. A., Krishtop V. V., Gilev D. G., Maksimenko V. A., Perminov A. V.** Measuring the Birefringence Value of a PANDA Fiber Using a Sagnac Interferometer 845

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

- Altay Ye., Kuzivanov D. O., Rozhdestvensky D. A., Sannikov M. I., Stepanova K. A.** Methods for Filtering Acoustic Emission Signals When Monitoring Defect Formation in the Process of Direct Laser Growth of Products 852
- Zenevich A. O., Mansurov T. M., Kovalenko T. G., Novikov E. V., Zhdanovich S. V.** Identification of Liquids and Determination of Aqueous Solutions Concentration Using Optical Fiber 869
- Lyutikova M. N., Korobeinikov S. M., Ridel A. V.** Application of IR Spectroscopy for Quality Control of Liquid Dielectric 876
- Shalamay L. I., Maiorov E. E., Mendosa E. Yu., Lampusova V. B., Oksas N. S.** Using a Spectrophotometer in a Study of Samples to Check Control Fixation of the Filler to the Tooth Section with Dental Cement 887

To the Authors!

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

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

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

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

Submission includes two copies of:

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

— extended abstract (150—250 words);

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

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

— the recommendation of the Department (laboratory);

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

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

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

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

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

Don't insert formulas from MathCad or MatLab!

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

Editorial Staff

ФОРМИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВ ТРОИЧНЫХ КАСАМИ-ПОДОБНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ
ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

В. Г. Стародубцев*, Е. А. Четвериков

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

Аннотация. Представлены наборы векторов индексов децимации $I_S(i_{d1}, i_{d2}, \dots, i_{dn})$ базисных троичных M -последовательностей, на основании которых в конечных полях $GF(3^S)$ ($S = 4, 6, 8$) формируются малые и большие множества касами-подобных последовательностей (КПП) с периодами $N = 3^S - 1 < 20\,000$. Показано, что для четных значений S периодическая взаимно корреляционная функция малого множества КПП является трехуровневой с максимальным значением модуля периодической взаимно корреляционной функции $|R_{\max}| = (3^{S/2} + 1)$. Корреляционная функция большого множества при $S = 4$ является восьмиуровневой с $|R_{\max}| = (2 \times 3^{S/2} + 1)$, а при $S = 6, 8$ — десятиуровневой с $|R_{\max}| = (3^{S/2+1} + 1)$. Приведены значения объемов малого и большого множеств троичных КПП.

Ключевые слова: конечные поля, корреляционная функция, M -последовательности, последовательности Касами, индексы децимации

Ссылка для цитирования: Стародубцев В. Г., Четвериков Е. А. Формирование множеств троичных касами-подобных последовательностей для систем передачи цифровой информации // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 10. С. 807—817. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-807-817.

FORMATION OF SETS OF TERNARY KASAMI-LIKE SEQUENCES
FOR DIGITAL INFORMATION TRANSMISSION SYSTEMS

V. G. Starodubtsev*, E. A. Chetverikov

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

Abstract. Sets of vectors of decimation indices $I_S(i_{d1}, i_{d2}, \dots, i_{dn})$ of ternary M -sequences are presented, on the basis of which small and large sets of Kasami-similar sequences (KSS) with periods $N = 3^S - 1 < 20\,000$ are formed in finite fields $GF(3^S)$ ($S = 4, 6, 8$). It is shown that for even values of S , the periodic cross-correlation function of a small set of KSS is three-level with the maximum value of the module of the mutual correlation function $|R_{\max}| = (3^{S/2} + 1)$. The correlation function of a large set at $S = 4$ is eight-level with $|R_{\max}| = (2 \cdot 3^{S/2} + 1)$, and at $S = 6, 8$ is ten-level with $|R_{\max}| = (3^{S/2+1} + 1)$. The values of the volumes of small and large sets of ternary KSS are given.

Keywords: finite fields, correlation function, M -sequences, Kasami sequences, decimation indices

For citation: Starodubtsev V. G., Chetverikov E. A. Formation of sets of ternary Kasami-like sequences for digital information transmission systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 10. P. 807—817 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-807-817.

В системах передачи цифровой информации (СПЦИ) защищенность от преднамеренных помех повышается за счет применения сигналов с расширенным спектром, формируемых на основе псевдослучайных последовательностей [1—4]. В различных режимах работы

СПЦИ могут использоваться как отдельные последовательности, так и множества последовательностей с заданными корреляционными и структурными свойствами [5].

В системах передачи цифровой информации при формировании фазоманипулированных сигналов с расширенным спектром в основном применяются двоичные псевдослучайные последовательности (ПСП), такие как М-последовательности (МП), последовательности Голда, Касами [2, 4, 6]. Эти последовательности обладают хорошими авто- и взаимно корреляционными свойствами.

Одним из направлений развития СПЦИ является переход от двоичных сигналов к многопозиционным, в частности — многофазным. Многофазные сигналы с расширенным спектром формируются на основе недвоичных ПСП и обеспечивают повышение помехозащищенности СПЦИ в условиях воздействия узкополосных и широкополосных помех. Например, в системах спутниковой связи с кодовым многостанционным доступом множества троичных ПСП могут применяться в виде фазоманипулированных на 120° сигналов, которые представляют собой эквидистантную систему сигналов [7—9].

Вопросам разработки алгоритмов формирования недвоичных ПСП с хорошими корреляционными и структурными свойствами посвящено большое число публикаций [10—18]. В работах [10—13] проанализированы методы формирования множеств троичных последовательностей, синтезируемых на основе децимации МП по различным индексам. В статьях [14—18] синтезированы множества недвоичных последовательностей с низким уровнем взаимной корреляции.

При формировании множеств троичных последовательностей, у которых порядок вычисления проверочных полиномов аналогичен порядку вычисления полиномов для двоичных последовательностей Касами и Голда [5, 6, 19], будем использовать термины „касами-подобные последовательности“ (КПП) и „голд-подобные последовательности“ (ГПП). Необходимость введения термина определяется тем, что при совпадении структуры проверочных полиномов троичных КПП и ГПП их корреляционные свойства отличаются от двоичного случая.

Целью статьи является определение в полях $GF(3^S)$ при $S = 4, 6, 8$ векторов индексов децимации $\mathbf{I}_S(i_{d1}, i_{d2}, \dots, i_{dn})$ для формирования малого и большого множеств КПП с низким уровнем взаимной корреляции.

По аналогии с двоичным случаем возможно формирование как малого, так и большого множества троичных КПП. Эти последовательности формируются путем сложения по $\text{mod}3$ базисной МП и одной (для малого множества) или двух (для большого множества) последовательностей, полученных на основе децимации базисной МП по индексам i_{di} , равным показателям степени корней α^i минимальных полиномов поля $GF(3^S)$. При формировании больших множеств троичных КПП используются полиномы, участвующие в образовании предпочтительных пар МП и соответственно троичных голд-подобных последовательностей.

При выполнении вычислений будем использовать подстрочные индексы „МК“ для характеристик малого множества троичных КПП, „БК“ — для большого множества КПП, „Г“ — для множества ГПП, „ПП“ — для предпочтительных пар МП. Например, в статье применяются следующие обозначения: $\mathbf{I}_{S,МК}(i_{d1}, i_{d2}, \dots, i_{dn})$ — для векторов индексов децимации малого множества троичных КПП, $\mathbf{I}_{S,БК}(i_{d1}, \dots, i_{dl})$ — для большого множества КПП, $\mathbf{I}_{S,Г}(i_{d1}, \dots, i_{dk})$ — для множества ГПП.

Символы c_i ($i = 0, \dots, N-1$) базисной МП с периодом $N = 3^S - 1$, представленной в каноническом виде, определяются выражением [2, 6]:

$$c_i = \text{tr}_{S1}(\alpha^i), \quad (1)$$

где $\text{tr}_{S1}(\alpha^i)$ — функция следа примитивного элемента α из расширенного поля $GF(3^S)$ в простом поле $GF(3)$.

Троичные последовательности малого множества КПП с периодом $N = 3^S - 1$ формируются в конечном поле $GF(3^S)$ на основании проверочного полинома $h_{МК}(x)$, являющегося произведением примитивного полинома степени S и неприводимого полинома степени $S/2$. При этом модуль максимального значения периодической взаимно корреляционной функции (ПВКФ) и объем малого множества КПП определяются выражениями [5, 6]:

$$|R_{\max}|_{МК} = 3^{S/2} + 1, \tag{2}$$

$$V_{МК} = 3^{S/2}. \tag{3}$$

Троичные КПП малого множества с периодом $N = 3^4 - 1 = 80$ формируются в конечном поле $GF(3^4)$ с полиномом $f(x) = x^4 + 2x^3 + 2$, в котором имеется восемь примитивных полиномов и два неприводимых полинома степени 2, период корней которых равен $N = 8$ (табл. 1).

Таблица 1

Неприводимые полиномы в поле $GF(3^4)$, $f(x) = x^4 + 2x^3 + 2$

α^i	Полиномы $h_i(x)$	Корни полиномов (показатели степени)	Периоды корней
α^1	$h_1(x) = x^4 + 2x^3 + 2$	$\alpha^1, \alpha^3, \alpha^9, \alpha^{27}$	80
α^7	$h_7(x) = x^4 + x^3 + x^2 + 2x + 2$	$\alpha^7, \alpha^{21}, \alpha^{63}, \alpha^{29}$	80
α^{11}	$h_{11}(x) = x^4 + 2x^3 + 2x^2 + x + 2$	$\alpha^{11}, \alpha^{33}, \alpha^{19}, \alpha^{57}$	80
α^{13}	$h_{13}(x) = x^4 + 2x + 2$	13, 39, 37, 31	80
α^{17}	$h_{17}(x) = x^4 + x^3 + 2x^2 + 2x + 2$	17, 51, 73, 59	80
α^{23}	$h_{23}(x) = x^4 + 2x^3 + x^2 + x + 2$	23, 69, 47, 61	80
α^{41}	$h_{41}(x) = x^4 + x^3 + 2$	41, 43, 49, 67	80
α^{53}	$h_{53}(x) = x^4 + x + 2$	53, 79, 77, 71	80
α^{10}	$h_{10}(x) = x^2 + 2x + 2$	10, 30	8
α^{50}	$h_{50}(x) = x^2 + x + 2$	50, 70	8

Нижние индексы в полиномах $h_i(x)$ здесь и в дальнейшем соответствуют минимальным показателям степени корней данных полиномов и равны индексам децимации i_{di} базисной МП с $h_{МП}(x) = h_1(x)$ при формировании других МП или ПСП с проверочными полиномами $h_i(x)$.

Анализ ПВКФ МП с проверочным полиномом $h_1(x)$ (период $N = 80$) и МП с полиномами $h_{10}(x)$ и $h_{50}(x)$ (период $N = 8$) показал, что взаимно корреляционная функция $R(\tau)$ является двухуровневой и принимает следующие значения: $R(\tau) = [-10; 3, 5]$.

Для полинома $h_1(x)$ малые множества КПП с периодом $N = 3^4 - 1 = 80$ формируются на основании следующих проверочных полиномов:

$$h_{МК1}(x) = h_1(x)h_{10}(x) = (x^4 + 2x^3 + 2)(x^2 + 2x + 2);$$

$$h_{МК2}(x) = h_1(x)h_{50}(x) = (x^4 + 2x^3 + 2)(x^2 + x + 2).$$

Анализ корреляционных свойств показал, что ПВКФ последовательностей малого множества КПП $R_{S,МК}$ с $h_{МК}(x)$ и периодом $N = 80$ является трехуровневой и принимает следующие значения: $R_{S,МК}(\tau) = R_{4,МК}(\tau) = [-10; -1; 3, 5]$.

В общем виде ПВКФ троичных КПП малого множества в полях $GF(3^S)$ определяется выражением

$$R_{S,МК}(\tau) = [(-3^{S/2} - 1); -1; (0, 5 \times 3^{S/2} - 1)]. \tag{4}$$

Таким образом, при $S = 4$ вектор индексов децимации для формирования малых множеств троичных КПП имеет вид

$$\mathbf{I}_{S,МК}(i_{d1}, i_{d2}) = \mathbf{I}_{4,МК}(10, 50). \tag{5}$$

В поле $GF(3^4)$ имеется восемь примитивных полиномов, поэтому всего можно сформировать $M_{S,МК} = M_{4,МК} = 16$ малых множеств троичных КПП с периодом $N = 80$, максимальным значением $|R_{\max}|_{МК} = 3^{S/2} + 1 = 10$ и объемом $V_{4,МК} = 3^{S/2} = 9$.

Для полинома $h_1(x)$ множества ГПП с периодом $N = 3^4 - 1 = 80$ и объемом $V_{4,\Gamma} = 3^4 + 1 = 82$ формируются на основании следующих проверочных полиномов:

$$h_{\Gamma 1}(x) = h_1(x)h_{11}(x) = (x^4 + 2x^3 + 2)(x^4 + 2x^3 + 2x^2 + x + 2);$$

$$h_{\Gamma 2}(x) = h_1(x)h_{17}(x) = (x^4 + 2x^3 + 2)(x^4 + x^3 + 2x^2 + 2x + 2).$$

Тогда для восьми примитивных полиномов поля $GF(3^4)$ число множеств троичных ГПП $M_{4,\Gamma} = 8$.

Выражение для ПВКФ ПП троичных МП и последовательностей множества ГПП в общем виде при $S = 0 \pmod 2$ определяется выражением

$$R_{S,\text{ПП}}(\tau) = R_{S,\Gamma}(\tau) = [(-3^{S/2} - 1); -1; (3^{S/2} - 1); (2 \times 3^{S/2} - 1)]. \quad (8)$$

На рис. 2 показана ПВКФ $R_{4,\Gamma}(\tau)$ двух последовательностей из множества ГПП с $h_{\Gamma 3}(x) = h_{23}(x)h_{53}(x)$, удовлетворяющая (6) и (8).

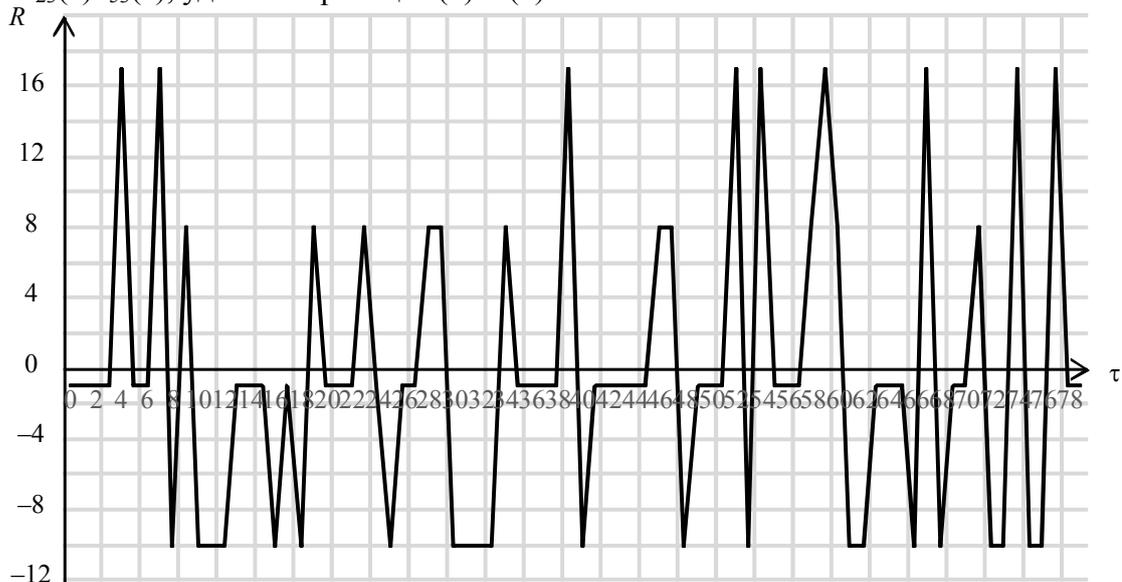


Рис. 2

С учетом предпочтительных пар МП и проверочных полиномов для последовательностей малого множества были получены проверочные полиномы последовательностей большого множества КПП для полинома $h_1(x)$:

$$h_{\text{БК1}}(x) = h_1(x)h_{10}(x)h_{11}(x) = (x^4 + 2x^3 + 2)(x^2 + 2x + 2)(x^4 + 2x^3 + 2x^2 + x + 2);$$

$$h_{\text{БК2}}(x) = h_1(x)h_{10}(x)h_{17}(x) = (x^4 + 2x^3 + 2)(x^2 + 2x + 2)(x^4 + x^3 + 2x^2 + 2x + 2);$$

$$h_{\text{БК3}}(x) = h_1(x)h_{50}(x)h_{11}(x) = (x^4 + 2x^3 + 2)(x^2 + x + 2)(x^4 + 2x^3 + 2x^2 + x + 2);$$

$$h_{\text{БК4}}(x) = h_1(x)h_{50}(x)h_{17}(x) = (x^4 + 2x^3 + 2)(x^2 + x + 2)(x^4 + x^3 + 2x^2 + 2x + 2). \quad (9)$$

Так как проверочный полином при формировании большого множества КПП содержит три множителя, включая $h_1(x)$, вектор индексов децимации становится двумерным и определяется выражением

$$\mathbf{I}_{S,\text{БК}}[i_{d1}, \dots, i_{dn}] = \mathbf{I}_{4,\text{БК}}[(10, 11), (10, 17), (50, 11), (50, 17)]. \quad (10)$$

Для произвольного примитивного полинома $h_i(x)$ проверочные полиномы большого множества КПП образуются путем умножения индексов полиномов из (9) на значение i по $\pmod{80}$. При этом выбираются минимальные индексы, соответствующие показателям степени корней данных полиномов.

Например, для примитивного полинома $h_{13}(x)$ выражения (9) преобразуются к виду

$$h_{\text{БК5}}(x) = h_{13}(x)h_{10 \times 13 \pmod{80}}(x)h_{11 \times 13 \pmod{80}}(x) = h_{13}(x)h_{50}(x)h_7(x);$$

$$h_{\text{БК6}}(x) = h_{13}(x)h_{10 \times 13 \pmod{80}}(x)h_{17 \times 13 \pmod{80}}(x) = h_{13}(x)h_{50}(x)h_{23}(x);$$

$$h_{\text{БК7}}(x) = h_{13}(x)h_{50 \times 13 \pmod{80}}(x)h_{11 \times 13 \pmod{80}}(x) = h_{13}(x)h_{10}(x)h_7(x);$$

$$h_{\text{БК8}}(x) = h_{13}(x)h_{50 \times 13 \pmod{80}}(x)h_{17 \times 13 \pmod{80}}(x) = h_{13}(x)h_{10}(x)h_{23}(x).$$

Всего можно сформировать $M_{4,БК} = 16$ больших множеств троичных КПП. Каждое большое множество составляет $V_{4,БК} = 737$ последовательностей.

Анализ корреляционных свойств большого множества троичных КПП показал, что ПВКФ в общем случае является восьмиуровневой:

$$R_{4,БК}(\tau) = [-14,5; -10; -5,5; -1; 3,5; 8; 12,5; 17].$$

Представим в общем виде выражение для ПВКФ большого множества троичных КПП

$$R_{4,БК}(\tau) = [(-1,5 \times 3^{S/2} - 1); (-3^{S/2} - 1); (-0,5 \times 3^{S/2} - 1); -1; (0,5 \times 3^{S/2} - 1); (3^{S/2} - 1); (1,5 \times 3^{S/2} - 1); (2 \times 3^{S/2} - 1)]. \quad (11)$$

На рис. 3 показана ПВКФ $R_{4,БК}(\tau)$ двух последовательностей из большого множества КПП с $h_{БК7}(x) = h_{13}(x)h_{10}(x)h_7(x)$.

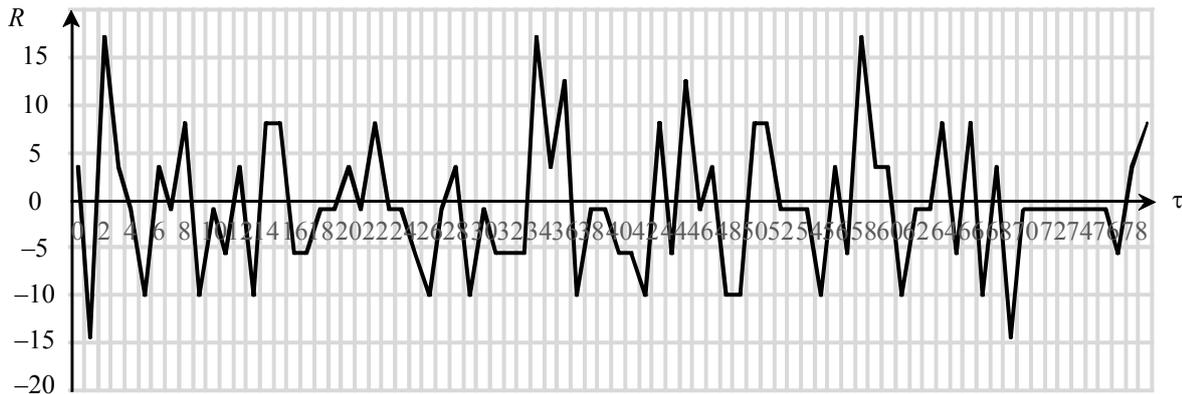


Рис. 3

Рассмотрим формирование множеств троичных ГПП и КПП с периодом $N = 3^6 - 1 = 728$. Троичные ГПП и КПП с периодом $N = 3^6 - 1 = 728$ формируются в конечном поле $GF(3^6)$ с полиномом $f(x) = x^6 + x + 2$, в котором имеется сорок восемь примитивных полиномов с индексами децимации 1, 5, 11, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 37, 41, 43, 47, 53, 59, 61, 67, 71, 73, 79, 95, 97, 101, 103, 107, 113, 115, 121, 125, 131, 149, 151, 155, 157, 185, 187, 197, 205, 211, 215, 229, 233, 239, 241, 365, 395, 401, 485 базисной МП с $h_1(x)$ и четыре неприводимых полинома с периодом $N = 26$ и индексами децимации 28, 140, 196, 476.

Анализ корреляционных свойств МП с проверочным полиномом $h_1(x)$ (период $N = 728$) и МП с полиномами $h_{28}(x)$, $h_{140}(x)$, $h_{196}(x)$ и $h_{476}(x)$ (период $N = 26$) показал, что все ПВКФ отличаются друг от друга. Можно выделить четыре типа функции корреляции

$$\begin{aligned} R_{1-28}(\tau) &= [-28(224); 12,5(504)]; \\ R_{1-140}(\tau) &= [-14,5(336); -1(168); 12,5(168); 53(56)]; \\ R_{1-196}(\tau) &= [-28(168); -1(336); 12,5(56); 26(168)]; \\ R_{1-476}(\tau) &= [-28(56); -14,5(336); 12,5(168); 26(168)], \end{aligned}$$

три из которых удовлетворяют граничным оценкам (2).

При этом вектор индексов децимации при формировании малого множества КПП имеет вид

$$\mathbf{I}_{S,МК}(i_{d1}, i_{d2}, i_{d3}) = \mathbf{I}_{6,МК}(28, 196, 476). \quad (12)$$

Соответственно можно сформировать три типа малых множеств КПП с проверочными полиномами

$$\begin{aligned} h_{МК1}(x) &= h_1(x)h_{28}(x) = (x^6+x+2)(x^3+2x^2+1); \\ h_{МК2}(x) &= h_1(x)h_{196}(x) = (x^6+x+2)(x^3+2x^2+x+1); \end{aligned}$$

$$h_{МК3}(x) = h_1(x)h_{476}(x) = (x^6+x+2)(x^3+2x+1).$$

Взаимно корреляционная функция данных множеств является трех-, четырех- и пяти-уровневой и определяется выражениями

$$R_{6,МК1}(\tau) = [-28; -1; 12,5];$$

$$R_{6,МК2}(\tau) = [-28; -1; 12,5; 26];$$

$$R_{6,МК3}(\tau) = [-28; -14,5; -1; 12,5; 26].$$

Всего можно сформировать по $M_{6,МК} = 48$ малых множеств КПП каждого типа с $V_{6,МК} = 27$. На рис. 4 показан сегмент длиной в сто символов ПВКФ $R_{6,МК1}(\tau)$ последовательностей малого множества КПП 1-го типа, $h_{МК1}(x) = h_1(x)h_{28}(x)$.

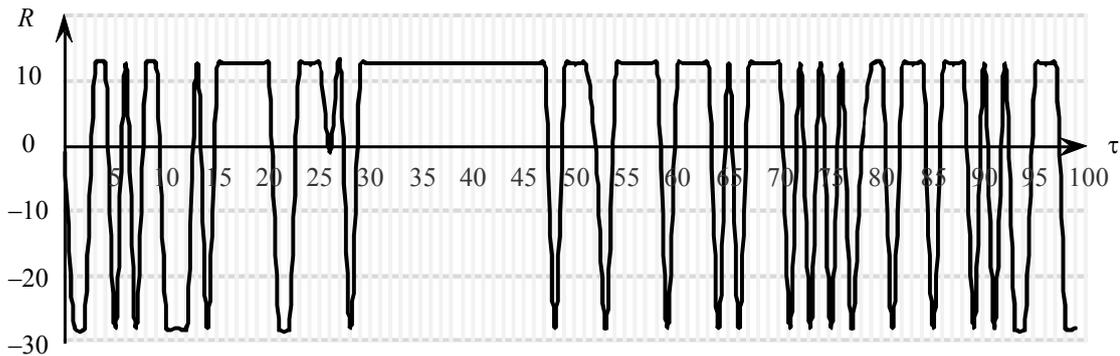


Рис. 4

Для формирования большого множества КПП с периодом $N = 728$ в конечном поле $GF(3^6)$ сначала определим ПП МП. Анализ корреляционных свойств всевозможных пар МП показал, что для полинома $h_1(x)$ существует всего два примитивных полинома $h_{29}(x)$ и $h_{53}(x)$, на основании которых можно построить две ПП МП и ГПП с четырехуровневой ПВКФ, удовлетворяющей (8):

$$R_{4,ПП}(\tau) = R_{4,Г}(\tau) = [-28; -1; 26; 53].$$

Вектор индексов децимации при формировании множеств троичных ГПП определяется выражением

$$\mathbf{I}_{S,Г}(i_{d1}, i_{d2}) = \mathbf{I}_{6,Г}(29, 53). \quad (13)$$

На основании ПП МП и малых множеств КПП для полинома $h_1(x)$ можно сформировать проверочные полиномы большого множества КПП. Анализ корреляционных свойств последовательностей показал, что ПВКФ больших множеств КПП является десятиуровневой с модулем максимального значения корреляционной функции $|R_{\max}|_{БК} = 3^{S/2+1} - 1 = 80$.

Проверочные полиномы больших множеств КПП определяются выражениями

$$h_{БК1}(x) = h_1(x)h_{28}(x)h_{29}(x);$$

$$h_{БК2}(x) = h_1(x)h_{28}(x)h_{53}(x);$$

$$h_{БК3}(x) = h_1(x)h_{196}(x)h_{29}(x);$$

$$h_{БК4}(x) = h_1(x)h_{196}(x)h_{53}(x).$$

Вектор индексов децимации при формировании больших множеств КПП имеет вид

$$\mathbf{I}_{S,БК}[i_{d1}, \dots, i_{dn}] = \mathbf{I}_{6,БК}[(28, 29), (28, 53), (196, 29), (196, 53)]. \quad (14)$$

Последовательностям данного множества соответствует десятиуровневая ПВКФ

$$R_{6,БК}(\tau) = [-41,5; -28; -14,5; -1; 12,5; 26; 39,5; 53; 66,5; 80].$$

Всего можно сформировать $M_{6,БК} = 98$ больших множеств КПП с $V_{6,БК} = 19\ 655$. На рис. 5 показан сегмент длиной в сто символов ПБКФ $R_{6,БК}(\tau)$ последовательностей большого множества КПП с периодом $N = 728$, $h_{БК1}(x) = h_1(x)h_{28}(x)h_{29}(x)$.

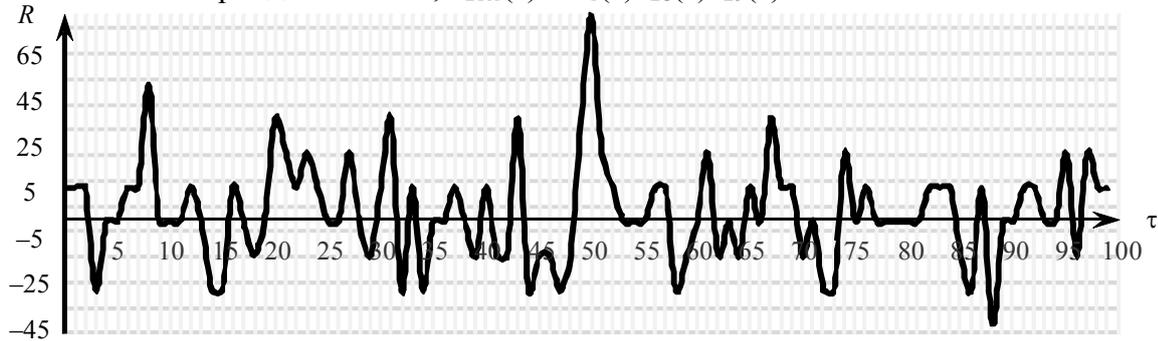


Рис. 5

В общем виде ПБКФ большого множества троичных КПП с периодом $N = 728$ определяется выражением

$$R_{6,БК}(\tau) = [(-1,5 \times 3^{S/2} - 1); (-3^{S/2} - 1); (-0,5 \times 3^{S/2} - 1); -1; (0,5 \times 3^{S/2} - 1); (3^{S/2} - 1); (1,5 \times 3^{S/2} - 1); (2 \times 3^{S/2} - 1); (2,5 \times 3^{S/2} - 1); (3 \times 3^{S/2} - 1)]. \quad (15)$$

Троичные ГПП и КПП с периодом $N = 3^8 - 1 = 6560$ формируются в конечном поле $GF(3^8)$ с полиномом $f(x) = x^8 + 2x^3 + 2$, в котором имеется триста двадцать примитивных полиномов с индексами децимации 1, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 43, 47, 49, 53, 59, 61, 67, 71, ..., 3317, 3371, 3389, 3401, 3533, 3563, 3617, 3641, 4103, 4121, 4373 базисной МП с $h_1(x)$ и восемь неприводимых полиномов с периодом $N = 80$ и индексами децимации 82, 574, 902, 1066, 1394, 1886, 3362, 4346.

Анализ ПБКФ МП с периодом $N = 6560$ и ПСП с периодом $N = 80$ показал, что можно сформировать два малых множества КПП в соответствии с вектором индексов децимации

$$\mathbf{I}_{S,МК}(i_{d1}, i_{d2}) = \mathbf{I}_{8,МК}(82, 3362). \quad (16)$$

Корреляционная функция малых множеств КПП является трехуровневой и удовлетворяет (4):

$$R_{8,МК}(\tau) = [-82; -1; 39,5].$$

Множества ГПП с периодом $N = 6560$ образуются на основании ПП МП. Вектор индексов децимации содержит всего два из трехсот двадцати возможных индексов децимации

$$\mathbf{I}_{S,\Gamma}(i_{d1}, i_{d2}) = \mathbf{I}_{8,\Gamma}(83, 161).$$

Периодическая взаимно корреляционная функция множества троичных ГПП является четырехуровневой и удовлетворяет (8):

$$R_{8,\Gamma}(\tau) = [-82; -1; 80; 161].$$

Большие множества КПП формируются на основании векторов индексов децимации $\mathbf{I}_{8,МК}(82, 3362)$ и $\mathbf{I}_{8,\Gamma}(83, 161)$.

Проверочные полиномы больших множеств КПП задаются выражениями

$$h_{БК1}(x) = h_1(x)h_{82}(x)h_{83}(x);$$

$$h_{БК2}(x) = h_1(x)h_{82}(x)h_{161}(x);$$

$$h_{БК3}(x) = h_1(x)h_{3362}(x)h_{83}(x);$$

$$h_{БК4}(x) = h_1(x)h_{3362}(x)h_{161}(x).$$

Вектор индексов децимации при формировании больших множеств КПП имеет вид

$$\mathbf{I}_{S,БК}[i_{d1}, \dots, i_{dn}] = \mathbf{I}_{8,БК}[(82, 83), (82, 161), (3362, 83), (3362, 161)]. \quad (17)$$

Последовательностям данного множества соответствует десятиуровневая ПВКФ, которая удовлетворяет (15):

$$R_{8, \text{БК}}(\tau) = [-122,5; -82; -41,5; -1; 39,5; 80; 120,5; 161; 201,5; 242].$$

Таким образом, для каждого примитивного полинома можно синтезировать по четыре больших множества КПП с десятиуровневой ПВКФ.

Основные корреляционные и структурные характеристики больших и малых множеств КПП, а также множеств ГПП, формируемых в конечных полях $\text{GF}(3^S)$, для четных значений параметра S приведены в табл. 2—4.

Таблица 2

Характеристики малых множеств троичных КПП

S	N	$\mathbf{I}_{S, \text{МК}}[i_{d1}, i_{dn}]$	Значения ПВКФ	$ R_{\text{max}} $	Число уровней ПВКФ	$V_{S, \text{МК}}$	$M_{S, \text{МК}}$
4	80	10, 50	-10; -1; 3,5	10	3	9	16
6	728	28	-28; -1; 12,5	28	3	27	48
6	728	196	-28; -1; 12,5; 26	28	4	27	48
6	728	476	-28; -14,5; -1; 12,5; 26	28	5	27	48
8	6560	82, 3362	-82; -1; 39,5	82	3	81	640

Таблица 3

Характеристики множеств троичных ГПП

S	N	$\mathbf{I}_{S, \Gamma}[i_{d1}, i_{d2}]$	Значения ПВКФ	$ R_{\text{max}} $	Число уровней ПВКФ	$V_{S, \Gamma}$	$M_{S, \Gamma}$
4	80	10, 50	-10; -1; 8; 17	17	4	82	8
6	728	29, 53	-28; -1; 26; 53	53	4	730	48
8	6560	83, 161	-82; -1; 80; 161	161	4	6562	320

Таблица 4

Характеристики больших множеств троичных КПП

S	N	$\mathbf{I}_{S, \text{БК}}[i_{d1}, \dots, i_{dn}]$	Значения ПВКФ	$ R_{\text{max}} $	Число уровней ПВКФ	$V_{S, \text{БК}}$	$M_{S, \text{БК}}$
4	80	(10, 11), (10, 17), (50, 11), (50, 17)	-14,5; -10; -5,5; -1; 3,5; 8; 12,5; 17	17	8	737	16
6	728	(28, 29), (28, 53), (196, 29), (196, 53)	-41,5; -28; -14,5; -1; 12,5; 26; 39,5; 53; 66,5; 80	80	10	19656	96
8	6560	(82, 83), (82, 161), (3362, 83), (3362, 161)	-122,5; -82; -41,5; -1; 39,5; 80; 120,5; 161; 201,5; 242	242	10	524959	640

Таким образом, в статье получены полные наборы векторов индексов децимации $\mathbf{I}_S(i_{d1}, \dots, i_{dn})$ для формирования малого и большого множеств троичных КПП, а также множеств троичных ГПП в полях $\text{GF}(3^S)$ при $S = 4, 6, 8$. Определены основные характеристики данных множеств: значения и число уровней ПВКФ, максимальные значения модуля взаимной корреляционной функции $|R_{\text{max}}|$, а также объемы множеств и число множеств с эквивалентными корреляционными свойствами.

Полученные результаты могут быть использованы при организации кодового много-станционного доступа в СПЦИ с большим числом абонентов на основе троичных фазоманипулированных сигналов с расширенным спектром.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишневецкий В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
3. Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. М.: Техносфера. 2007. 488 с.

4. CDMA: прошлое, настоящее, будущее / Под ред. Л. Е. Варакина и Ю. С. Шинакова. М.: МАС, 2003. 608 с.
5. Ипатов В. П. Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. М.: Радио и связь, 1992. 152 с.
6. Golomb S. W., Gong G. Signal Design for Good Correlation for Wireless Communication, Cryptography and Radar. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005.
7. Boztaş S., Özbudak F., Tekin E. Generalized nonbinary sequences with perfect autocorrelation flexible alphabets and new periods // Cryptogr. Commun. 2018. Vol. 10, N 3. P. 509.
8. Cho Chang-Min, Kim Ji-Youp, No J. S. New p-ary sequence families of period $(p^n - 1)/2$ with good correlation property using two decimated m-sequences // IEICE Transactions on Communications. 2015. Vol. E98, N 7. P. 1268.
9. Choi S. T., Lim T., No J. S., Chung H. On the Cross-Correlation of a p-Ary m-Sequence of Period $p^{2m} - 1$ and Its Decimated Sequences by $(p^{m+1})^2/2(p+1)$ // IEEE Trans. Inf. Theory. 2012. Vol. 58, N 3. P. 1873.
10. Dobbertin H., Helleseth T., Kumar P. V., Martinsen H. Ternary M-sequences with three-valued cross-correlation function: New decimations of Welch and Niho type // IEEE Trans. Inf. Theory. 2001. Vol. 47, N 4. P. 1473.
11. Helleseth T., Kumar P. V., Martinsen H. A new family of ternary sequences with ideal two-level autocorrelation function // Designs, Codes and Cryptography. 2001. Vol. 23, N 2. P. 157.
12. Hu Z., Li X., Mills D., Muller E., Sun W., Williams W., Yang Y., Zhang Z. On the cross-correlation of sequences with the decimation factor $d=(p^n+1)/(p+1)-(p^n-1)/2$ // Applicable Algebra Eng. Commun. Comput. 2001. Vol. 12. P. 255.
13. Seo E. Y., Kim Y. S., No J. S., Shin D. J. Cross-correlation distribution of p-ary m-sequence of period $p^{4k} - 1$ and its decimated sequences by $((p^{2k}+1)/2)$ // IEEE Trans. Inf. Theory. 2008. Vol. 54, N 7. P. 3140.
14. Jang J. W., Kim Y. S., No J. S., Helleseth T. New family of p-ary sequences with optimal correlation property and large linear span // IEEE Trans. Inf. Theory. 2004. Vol. 50, N 8. P. 1839.
15. Liang H., Tang Y. The cross correlation distribution of a p-ary m-sequence of period $p^m - 1$ and its decimated sequences by $(p^k+1)(p^m+1)/4$ // Finite Fields and Their Applications. 2015. Vol. 31. P. 137.
16. Lee W. J., Kim J. Y., No J. S. New families of p-ary sequence of period $(p^n - 1)/2$ with low maximum correlation magnitude // IEICE Transactions on Communications. 2014. Vol. E97-B, N 1. P. 2311.
17. Muller E. N. On the cross-correlation of sequences over GF(p) with short periods // IEEE Trans. Inf. Theory. 1999. Vol. 45, N 1. P. 289.
18. Song M. K., Song H. Y. A construction of odd length generators for optimal families of perfect sequences // IEEE Trans. Inf. Theory. 2018. Vol. 64, N 4. P. 2901.
19. Gold R. Maximal recursive sequences with 3-valued recursive cross-correlation functions // IEEE Trans. Inf. Theory. 1968. Vol. 14, N 1. P. 154.

Сведения об авторах

- Виктор Геннадьевич Стародубцев** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра технологий и средств автоматизации обработки и анализа информации космических средств; E-mail: vgstarod@mail.ru
- Евгений Александрович Четвериков** — ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра технологий и средств автоматизации обработки и анализа информации космических средств; слушатель; E-mail: vka@mil.ru

Поступила в редакцию 19.05.23; одобрена после рецензирования 25.05.23; принята к публикации 28.08.23.

REFERENCES

1. Vishnevskij V.M., Lyahov A.I., Portnoj S.L., Shahnovich I.V. *Shirokopolosnye besprovodnye seti peredachi informacii* (Broadband Wireless Data Transmission Network), Moscow, 2005, 592 p. (in Russ.)
2. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, Prentice Hall, 2001, 1079 p.
3. Ipatov V.P. *Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications*, NY, John Wiley and Sons Ltd., 2005, 488 p.
4. Varakin L.E. and Shinakov Yu.S., ed., *CDMA: proshloe, nastoyashchee, budushchee* (CDMA: Past, Present, Future), Moscow, 2003, 608 p. (in Russ.)
5. Ipatov V.P. *Periodicheskie diskretnye signaly s optimal'nymi korrelyacionnymi svoystvami* (Periodic Discrete Signals with Optimum Correlation Properties), Moscow, 1992, 152 p. (In Russ.).

6. Golomb S.W., Gong G. *Signal Design for Good Correlation for Wireless Communication, Cryptography and Radar*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2005.
7. Boztaş S., Özbudak F., Tekin E. *Cryptogr. Commun.*, 2018, no. 3(10), pp. 509.
8. Cho Chang-Min, Kim Ji-Youp, No J.S. *IEICE Transactions on Communications*, 2015, no. 7(E98), pp. 1268.
9. Choi S.T., Lim T., No J.S., Chung H. *IEEE Trans. Inf. Theory.*, 2012, no. 3(58), pp. 1873.
10. Dobbertin H., Helleseht T., Kumar P.V., Martinsen H. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2001, no. 4(47), pp. 1473.
11. Helleseht T., Kumar P.V., Martinsen H. *Designs, Codes and Cryptography*, 2001, no. 2(23), pp. 157.
12. Hu Z., Li X., Mills D., Muller E., Sun W., Williams W., Yang Y., Zhang Z. *Applicable Algebra Eng. Commun. Comput.*, 2001, vol. 12, pp. 255.
13. Seo E.Y., Kim Y.S., No J.S., Shin D.J. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2008, no. 7(54), pp. 3140.
14. Jang J.W., Kim Y.S., No J.S., Helleseht T. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2004, no. 8(50), pp. 1839.
15. Liang H., Tang Y. *Finite Fields and Their Applications*, 2015, vol. 31, pp. 137.
16. Lee W.J., Kim J.Y., No J.S. *IEICE Transactions on Communications*, 2014, no. 1(E97-B), pp. 2311.
17. Muller E.N. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1999, no. 1(45), pp. 289.
18. Song M.K., Song H.Y. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2018, no. 4(64), pp. 2901.
19. Gold R. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1968, no. 1(14), pp. 154.

Data on authors

- Victor G. Starodubtsev** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Technologies and means for Automating the Processing and Analysis of Spacecraft Information; E-mail: vgstarod@mail.ru
- Evgeny A. Chetverikov** — A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Technologies and Means for Automating the Processing and Analysis of Spacecraft Information; Student; E-mail: vka@mail.ru

Received 19.05.23; approved after reviewing 25.05.23; accepted for publication 28.08.23.

**ПОДХОД К АВТОМАТИЧЕСКОМУ РАСПОЗНАВАНИЮ ЭМОЦИЙ
В ТРАНСКРИПЦИЯХ РЕЧИ**А. А. ДВОЙНИКОВА^{1*}, К. О. КОНДРАТЕНКО²¹Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
Санкт-Петербург, Россия
**dvoynikova.a@iias.spb.su*²Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Исследован актуальный в различных областях вопрос распознавания эмоций в транскрипциях речи. Проанализировано влияние методов предобработки (удаление стоп-слов, лемматизация, стемминг) на точность распознавания эмоций в текстовых данных на русском и английском языках. Для проведения экспериментальных исследований использовались орфографические транскрипции диалогов из многомодальных корпусов RAMAS и CMU-MOSEI на русском и английском языке соответственно. Аннотирование этих корпусов выполнялось по следующим эмоциям: радость, удивление, страх, злость, грусть, отвращение и нейтральное состояние. Предобработка текстовых данных включала в себя удаление знаков пунктуации и стоп-слов, токенизацию, лемматизацию и стемминг. Векторизация полученного материала была осуществлена при помощи методов TF-IDF, BoW, Word2Vec. В качестве классификаторов выступили метод опорных векторов и логистическая регрессия. Разработан подход автоматического распознавания эмоций в текстовых данных, представляющий собой комбинацию методов. Для русского языка достигнута наибольшая точность распознавания эмоций по взвешенной F-мере = 92,63 %, для английского языка — 47,21 %. Кроме того, проведены исследования по выявлению количества удаленных стоп-слов для эффективного распознавания эмоций по текстовым данным. Результаты экспериментов показывают, что сохранение стоп-слов в исходном тексте позволяет достичь наиболее высокой точности классификации текстов.

Ключевые слова: распознавание эмоций, методы предобработки текстовых данных, удаление стоп-слов, многоклассовая классификация, анализ текстовых данных

Благодарности: работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда (раздел „Подход к классификации текстовых данных по эмоциям“ выполнен в рамках проекта № 22-11-00321), остальные исследования выполнены частично в рамках ведущей научной школы РФ (грант № НШ-17.2022.1.6) и бюджетной темы СПб ФИЦ РАН (№ FFZF-2022-0005).

Ссылка для цитирования: Двойникова А. А., Кондратенко К. О. Подход к автоматическому распознаванию эмоций в транскрипциях речи // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 10. С. 818—827. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-818-827.

APPROACH TO AUTOMATIC RECOGNITION OF EMOTIONS IN SPEECH TRANSCRIPTIONSA. A. Dvoynikova^{1*}, K. K. Kondratenko²¹St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg, Russia
*dvoynikova.a@iias.spb.su*²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Abstract. The issue of recognizing emotions in speech transcriptions, which is relevant in various fields, is studied. The influence of preprocessing methods (stop word removal, lemmatization, stemming) on the accuracy of emotion recognition in text data in Russian and English is analyzed. To conduct experimental studies, orthographic transcriptions of dialogues from the multimodal corpora RAMAS and CMU-MOSEI in Russian and English, respectively, are used. These corpora are annotated for the following emotions: joy, surprise, fear, anger, sadness, disgust and neutral. Preprocessing of text data includes removal of punctuation marks and stop words, tokenization, lemmatization and stemming. Vectorization of the resulting material is carried out using the TF-IDF, BoW, Word2Vec methods. The used classifiers are support vector machines and logistic regression. An approach is developed that is a combination of the above methods. For the Russian language, the highest accuracy of emotion recognition achieved using a weighted F-measure is

92.63 %, for the English language – 47.21 %. In addition, studies are conducted to identify the number of remote stops for effective emotion recognition from text data. Experimental results show that storing stop words in the source text allows to achieve the highest accuracy of text classification.

Keywords: emotion recognition, text data preprocessing methods, stop-words removal, multiclass classification, text data analysis

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of a project of the Russian Science Foundation (section “An approach to classifying text data by emotions” was carried out within the framework of project No. 22-11-00321), the rest of the research was carried out partially within the framework of the leading scientific school of the Russian Federation (grant No. NSh-17.2022.1.6) and the budget theme of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (No. FFZF-2022-0005).

For citation: Dvoynikova A. A., Kondratenko K. K. Approach to automatic recognition of emotions in speech transcriptions. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 10. P. 818—827 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-818-827.

Введение. Распознавание эмоций является одной из отраслей sentiment-анализа, изучающих вопросы выделения эмоционально окрашенных сегментов и их анализа [1]. Распознавание эмоций играет ключевую роль в областях, для которых важна реакция человека: бизнес, торговля, образование, сфера развлечений [2]. Кроме того, распознавание эмоций облегчает взаимодействие человека с машиной. В частности, с его помощью можно определить качество товаров и услуг, проанализировать состояние человека, осуществить прогноз политической ситуации на основе новостных лент или оценить взаимоотношения внутри учебного или рабочего коллектива. В связи с этим разрабатываются системы и методы анализа проявления эмоций. Человек может выражать эмоции с помощью мимики, жестов, интонаций, речи, поэтому большинство систем распознавания эмоций анализируют визуальные (изображения и видео) [3], акустические (аудиозаписи речи) [4] и лингвистические данные [5—7]. Некоторые исследования подтверждают, что текстовая модальность более репрезентативна при sentiment-анализе [8]. В связи с этим анализ методов обработки текстовой модальности является актуальным исследованием. В настоящей работе рассмотрены методы распознавания эмоций в тексте.

Анализ эмоциональной окраски представляет собой сложную задачу: в связи с субъективностью восприятия эмоций отсутствует единый принцип их классификации [9]. При решении этой задачи выделяют категориальный и многомерный подходы [10].

В первом случае предполагается, что можно выделить отдельные категории эмоций. К категориальным моделям эмоций относятся модели П. Экмана [11], К. Изарда [12]. На данный момент в области искусственного интеллекта используют распознавание базовых эмоций (модель Экмана) — радость, грусть, гнев, страх, отвращение, удивление, — а также нейтрального состояния [7].

Многомерный подход основан на представлении о том, что эмоции являются точками n -мерного пространства, оси которого определяются полюсами характеристик эмоционального состояния [13]. В области автоматического анализа модель Дж. Рассела [14] является наиболее используемой для описания эмоций. Рассел предложил расположить эмоции в двумерном пространстве — на осях полярности и интенсивности эмоций. Проецирование эмоций на ось полярности часто сводится к задаче распознавания тональности (негативная, нейтральная, позитивная) в текстовых данных [5, 6].

Целью настоящей статьи является определение эффективной комбинации методов анализа текстовых данных на русском и английском языках. Под эффективностью понимается достижение наибольшей точности распознавания эмоциональных состояний человека. Научная новизна статьи заключается в нахождении оптимального числа удаляемых стоп-слов в тексте для обеспечения максимальной точности классификации эмоций. Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований (наиболее эффективная комбинация

методов анализа текста), могут быть применены в задачах оценки качества товаров и услуг, распознавания токсичных сообщений в социальных сетях и др.

Методы анализа текстов. В общем виде распознавание эмоциональной окраски текста состоит из следующих этапов: предобработка исходных данных, извлечение признаков (векторизация), построение классификаторов машинного обучения и оценка качества классификаторов [15]. Первый этап необходим для стандартизации текста: данные приводятся к единой форме (заглавные буквы заменяются строчными и разные формы слова сводятся к одной) и удаляются знаки пунктуации. Этап извлечения признаков предназначен для представления текста в числовом виде. Все методы векторизации можно разделить на две группы: алгебраические (статистические и матричные) и нейросетевые. К традиционным методам векторизации относятся: мешок слов (Bag of Words, BoW), частотный метод (Term Frequency – Inverse Document Frequency, TF-IDF), прямое кодирование (One-hot encoding), сингулярное разложение (Singular Value Decomposition, SVD) [16]. К методам на основе нейронных сетей относят: Glove [17], FastText [18], Word2Vec [19], BERT [20], ELMo [21]. Они применяются в работах [6—8, 13] для анализа текстов. Далее извлеченные текстовые признаки подаются на вход классификатору для многоклассового распознавания эмоций. Классификаторы можно также разделить на две группы: традиционные (метод опорных векторов, логистическая регрессия, наивный Байес, деревья решений и др.) и нейросетевые (RNN, LSTM, Transformers). Все они применяются для распознавания сентимента и эмоций в текстовых данных в работах [5—8, 22].

При анализе текстов большую роль играет предобработка данных. Одной из проблем, связанных с подготовкой текстовых данных для машинного обучения, является большой объем информации, которую необходимо обработать. Таким образом, многие исследователи [5—7, 13, 22, 23] при предобработке удаляют из текста стоп-слова — слова, не содержащие смысловой нагрузки (например, предлоги, союзы, частицы и т.п.), чтобы выделить релевантную информацию и уменьшить размерность вектора [23].

Задача настоящей работы — определить влияние наличия стоп-слов в тексте и метода нормализации (лемматизация, стемминг) текстовых данных на точность распознавания эмоциональной окраски текста на русском и английском языках.

Подход к классификации текстовых данных по эмоциям. На рис. 1 представлены этапы распознавания эмоций в текстовых данных. Разработанный подход к классификации текстовых данных представляет собой комбинацию из следующих методов: сохранение стоп-слов в тексте, стемминг в качестве нормализации, TF-IDF в качестве векторизации, логистическая регрессия (для русскоязычных текстов) и метод опорных векторов (для англоязычных текстов) в качестве классификации. В рамках настоящей работы предлагается подход к классификации текстовых данных по их эмоциональной окраске, представленный на рис. 1.

На рис. 1 жирным шрифтом выделены методы, относящиеся к базовому подходу [15]. Синим цветом выделены блоки, в которых проводились эксперименты с различными методами. Цель исследования — найти оптимальную комбинацию методов для эффективного распознавания эмоций в текстовых данных.

На первом этапе исследований была выполнена предобработка исходного текста. Она включала в себя токенизацию, т.е. разбиение текста на отдельные значимые единицы (токены) — слова; приведение всех слов к нижнему регистру; удаление знаков пунктуации, нормализацию (лемматизация, стемминг или одновременно лемматизация и стемминг). Опционально выполнялось удаление стоп-слов (слов, не содержащих смысловой нагрузки, например, союзов, предлогов, частиц). Из полученного в библиотеке nltk языка Python списка стоп-слов были удалены слова, которые могут влиять на определение эмоций (например, „хорошо“, „не“, „даже“, „больше“, „лучше“, „again“, „all“, „each“, „few“, „no“, „not“). Форма слова не всегда несет в себе полезную информацию, поэтому при анализе текста производилась

нормализация слов, т.е. их приведение к единой форме. Нормализация может осуществляться двумя способами: лемматизацией и стеммингом. При лемматизации слово преобразуется к его начальной форме (лемме), а при стемминге — к его основе (отбрасываются окончания, суффиксы, приставки). Для экспериментов были использованы оба метода, а также их сочетание: лемматизация и последующий стемминг.

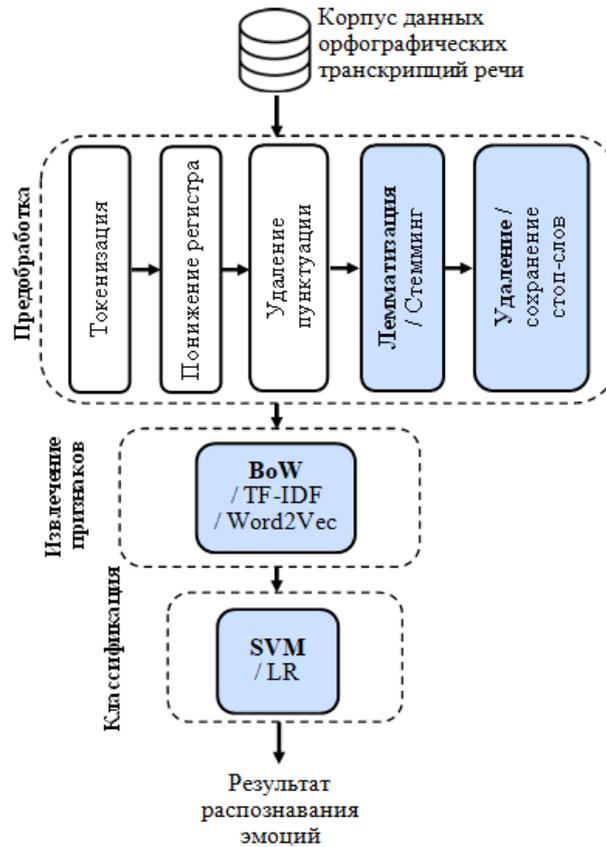


Рис. 1

Далее была произведена векторизация, поскольку перед тем, как использовать машинный классификатор, необходимо представить полученный текст в числовом виде. В настоящей работе применены методы Bag of Words, TF-IDF и Word2Vec [19].

На следующем этапе исследования в качестве классификаторов выступили метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) и логистическая регрессия (Logistic Regression, LR). Преимущества данных классификаторов заключаются в простоте их использования и высокой скорости обучения. Для каждого классификатора производился подбор гиперпараметров.

Для оценки точности предсказаний использовалась взвешенная F-мера, поскольку она наиболее репрезентативна при неравномерном распределении данных в классах.

Корпусы данных. Исследование проводилось на материале двух корпусов. Для русского языка использовались транскрипции (орфографические) аудиозаписей из многомодального корпуса RAMAS [24]. Он содержит записи спонтанных диалогов и монологов (для нейтральной речи) десяти актеров. При создании корпуса использовались диадические сценарии, в рамках которых говорящие импровизировали на заданную тему, воспроизводя определенную эмоцию. Данные размечены одной из базовых эмоций: радость, гнев, удивление, страх, грусть, отвращение и нейтральное состояние. Общий объем корпуса — 581 аудиозапись. Транскрипции диалогов корпуса RAMAS были получены нами с помощью автоматической системы распознавания речи (Automatic Speech Recognition, ASR) для 535 записей. Подробно

подход к извлечению лингвистической информации из аудиоданных корпуса RAMAS описан в работе [25].

Для английского языка использовались субтитры видеозаписей из многомодального корпуса CMU-MOSEI [26]. Он включает фрагменты речи более чем 1000 человек, полученные с платформы YouTube видеозаписи были подготовлены таким образом, чтобы в видео присутствовала речь только одного диктора. Так, часть записей представляет собой монологи, а часть — реплики из диалогов. Поскольку некоторые материалы данного корпуса имеют разметку нескольких эмоций одновременно, для эксперимента более чем из 23 000 фраз были выбраны только те, которые включали одну из перечисленных выше базовых эмоций. Так, объем исследуемого материала составил 14 802 фразы. Распределение фраз M корпусов RAMAS и CMU-MOSEI представлено на рис. 2.

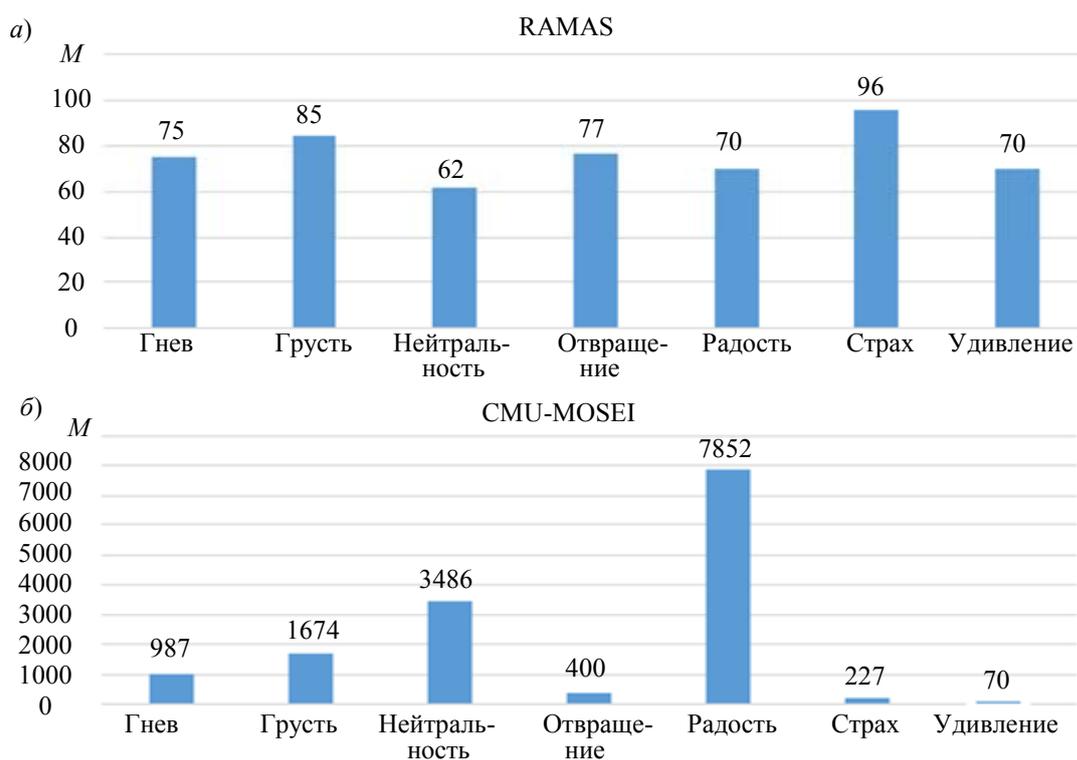


Рис. 2

Как видно из рис. 2, тексты корпуса RAMAS более сбалансированы, а в корпусе CMU-MOSEI существенно не сбалансированы по классам эмоций.

Результаты экспериментальных исследований. Всего было обработано 535 транскрипций для русского языка (RAMAS) и 14 802 текста субтитров для английского языка (CMU-MOSEI). Для каждого языка проведены эксперименты с целью нахождения наиболее эффективной (позволяющей достичь наибольшей точности распознавания) комбинации методов предобработки, нормализации, векторизации и классификации на качество распознавания эмоций в текстовых данных.

Результаты экспериментов, проведенных на материале корпусов RAMAS [24] и CMU-MOSEI [26], представлены в таблице (лем — лемматизация, стем — стемминг, лем+стем — лемматизация и последующий стемминг. Жирным шрифтом выделена наибольшая достигнутая точность для различных классификаторов. Курсивом выделены значения, полученные с помощью базового подхода. Нижним подчеркиванием отмечен лучший результат по методу предобработки.

Результаты классификации эмоций, взвешенная F-мера, %

Стоп-слова	Метод нормализации	Tf-idf		BoW		Word2Vec	
		SVM	LR	SVM	LR	SVM	LR
RAMAS							
Удалены	Лем	89,36	88,71	80,34	87,37	75,30	77,64
Удалены	Стем	88,69	89,55	81,94	88,43	75,69	78,60
Удалены	Лем+Стем	88,74	88,22	80,56	86,78	76,04	77,36
Сохранены	Лем	92,24	92,63	82,43	89,84	82,34	83,20
Сохранены	Стем	92,26	91,89	<u>82,77</u>	89,68	81,36	81,65
Сохранены	Лем+Стем	91,50	92,06	82,64	<u>89,93</u>	<u>82,57</u>	<u>83,67</u>
CMU-MOSEI							
Удалены	Лем	45,33	44,42	44,36	44,21	43,94	41,88
Удалены	Стем	45,97	45,48	44,50	44,56	<u>43,95</u>	40,68
Удалены	Лем+Стем	44,55	44,55	44,80	43,88	43,23	40,61
Сохранены	Лем	46,01	45,75	45,22	<u>45,15</u>	<u>43,95</u>	42,08
Сохранены	Стем	47,21	46,39	45,28	45,06	43,63	<u>42,22</u>
Сохранены	Лем+Стем	46,79	45,79	<u>45,35</u>	44,80	43,27	41,92

На рис. 3 представлены все используемые в экспериментах методы предобработки, векторизации и классификации. На оси абсцисс отражен показатель E процентного соотношения эффективности методов. Данный показатель высчитывался как отношение количества экспериментов, в которых метод достиг наибольшей точности, к общему количеству всех экспериментов.

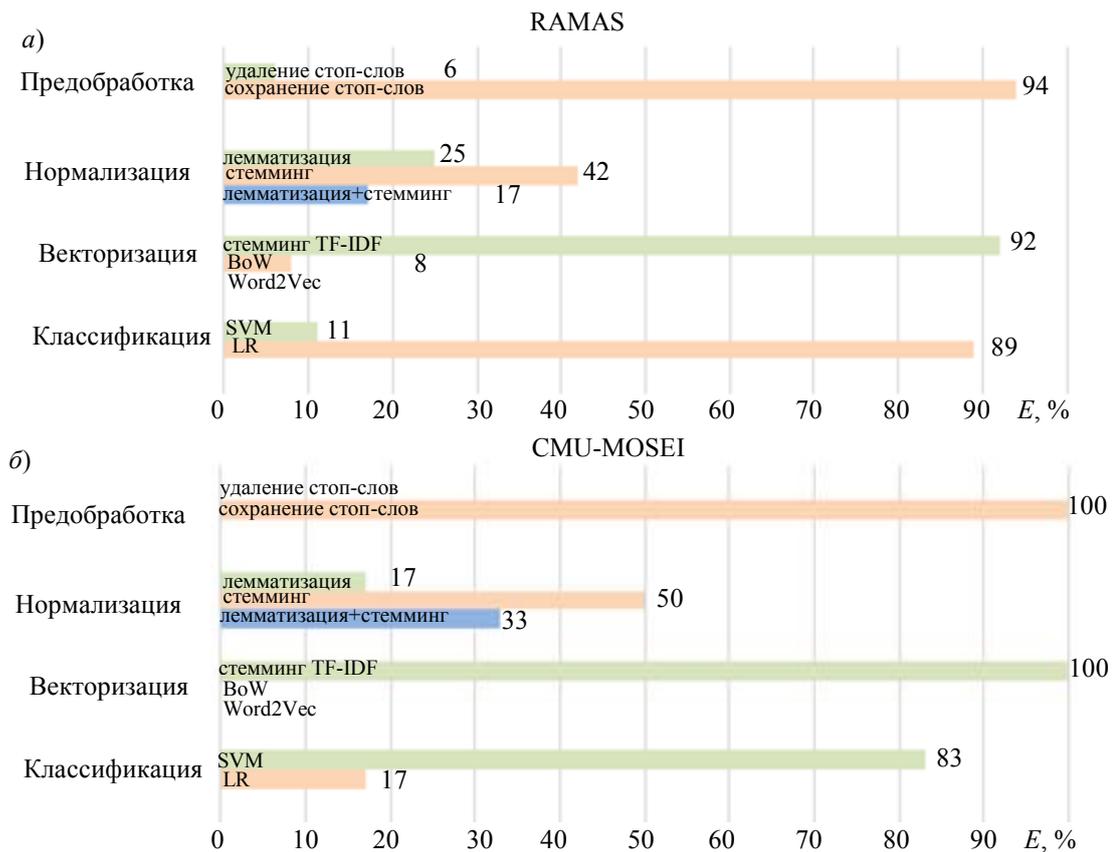


Рис. 3

На основании данных, приведенных выше, можно заметить, что для русского языка эксперименты с сохранением стоп-слов во всех случаях показывали большую точность, чем с удалением. Для корпуса на английском языке только в одном случае при удалении стоп-слов точность оказалась выше — в этом эксперименте для нормализации был использован стемминг,

и классификация была осуществлена методом опорных векторов. Во всех остальных случаях сохранение стоп-слов позволило достичь большей точности.

Поскольку на точность классификации могло повлиять удаление какого-то определенно-го слова или комбинации слов, было принято решение провести эксперимент с удалением разного числа стоп-слов для данных корпуса RAMAS. Для каждого числа стоп-слов (от 1 до 119) выбиралось по пять случайных комбинаций и оценивалась точность модели. Полученные в результате данные представлены на рис. 4, где на оси абсцисс указано число N удаляемых стоп-слов, на оси ординат — средняя точность классификации по показателю „взвешенная F-мера“.

Поскольку с удалением большего числа стоп-слов точность постепенно снижалась, можно сделать вывод, что в общем случае их удаление негативно влияет на определение эмоциональной окраски текста.

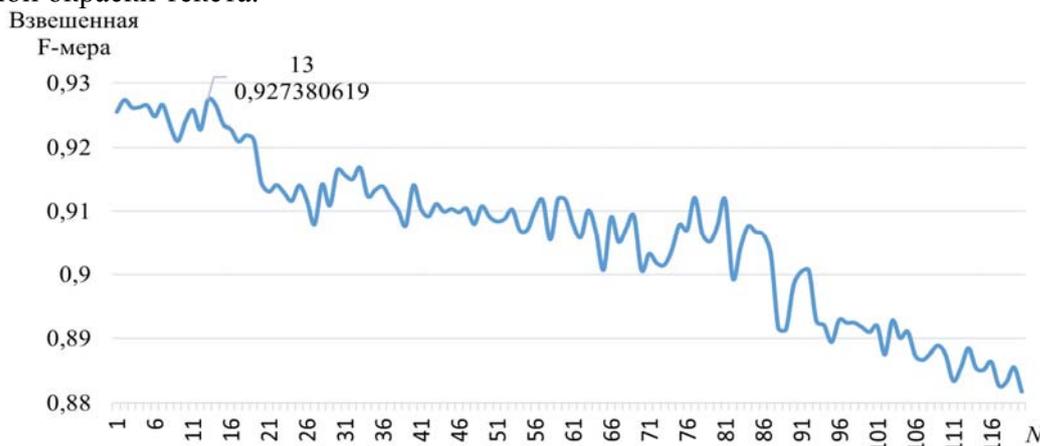


Рис. 4

Обсуждение результатов экспериментальных исследований. При изучении данных для методов нормализации текстовых данных удалось выяснить, что и для русского языка (в 50 % случаев), и английского (в 42 % случаев) точность классификации была выше при использовании стемминга. Что касается остальных методов, в экспериментах на материале русского языка большая точность распознавания эмоций была достигнута для лемматизации с последующим стеммингом, а в экспериментах на материале английского языка — для лемматизации.

Выбор в качестве метода векторизации TF-IDF позволил достичь более высоких результатов классификации эмоций во всех экспериментах для русского языка и в большей части экспериментов — для английского. Лишь в 8 % случаев точность была выше при векторизации статистическим методом Bag of Words. Кроме того, можно заметить, что TF-IDF обычно лучше работает в сочетании со стеммингом, а Bag of Words и Word2Vec — со стеммингом или лемматизацией с последующим стеммингом.

Классификация методом опорных векторов позволила достичь большей точности распознавания эмоциональной окраски текстов на английском языке, а классификация методом логистической регрессии — на русском. Для обоих классификаторов лучше справиться с задачей распознавания эмоций помогает векторизация методом TF-IDF.

Для русского языка наибольшая точность предсказания по взвешенной F-мере = 92,63 % была достигнута при сохранении стоп-слов в тексте, лемматизации при векторизации методом TF-IDF и классификации методом логистической регрессии. Данный результат превосходит результаты базового подхода (удаление стоп-слов, лемматизация, BoW и логистическая регрессия) на 12,29 %. Несмотря на то что для русского языка при стемминге результат классификации был выше в большей части случаев, именно применение лемматизации в сочетании с другими методами предобработки позволило достичь наибольшей точности определения эмоциональной окраски.

Для английского языка наибольшая точность предсказания по F-мере = 47,21 % была достигнута при сохранении стоп-слов в тексте и стемминге и векторизации методом TF-IDF и классификации методом опорных векторов. При базовом подходе удалось достичь F-меры = 44,36 %, что на 2,85 % ниже наилучшего результата.

Экспериментальные исследования показали, что количество удаленных из текста стоп-слов влияет на точность распознавания эмоций в текстовых данных. Из рис. 4 можно заметить, что чем больше стоп-слов удаляется из исходного текста, тем ниже точность классификации эмоции. Оптимальное число удаленных стоп-слов в тексте для корпуса RAMAS — 13, в таком случае достигается F-мера = 92,74 %. Данное значение на 0,11 % выше, чем при сохранении всех стоп-слов в тексте. Составление оптимального списка стоп-слов для классификации эмоций является нерешенной и актуальной задачей. Стоит также предположить, что для каждой задачи и каждого типа текстовых данных оптимальный список стоп-слов будет различным.

Заключение. На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы о результатах распознавания эмоций по текстовым данным с помощью различных методов preprocessing:

- 1) удаление стоп-слов снижает точность классификации эмоций в текстовых данных;
- 2) для русского и английского языков точность распознавания выше при использовании стемминга в качестве метода нормализации текстовых данных;
- 3) для русского и английского языков точность распознавания выше при использовании метода TF-IDF для векторизации;
- 4) в качестве классификаторов наиболее эффективна логистическая регрессия для русского языка, метод опорных векторов — для английского.

В качестве направления дальнейшего исследования можно предложить экспериментальное определение стоп-слов, удаление которых снижает эффективность модели классификации. Кроме того, дальнейшие работы могут быть связаны с улучшением результатов распознавания путем применения более сложных методов машинного обучения, в том числе нейросетевых архитектур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Acheampong F. A., Wenyu C., Nunoo-Mensah H.* Text-based emotion detection: Advances, challenges, and opportunities // *Engineering Reports*. 2020. Vol. 2, N 7. P. e12189. DOI: 10.1002/eng2.12189.
2. *Dzedzickis A., Kaklauskas A., Bucinskas V.* Human emotion recognition: Review of sensors and methods // *Sensors*. 2020. Vol. 20, N 3. P. 592. DOI: 10.3390/s20030592.
3. *Рюмина Е. В., Карпов А. А.* Аналитический обзор методов распознавания эмоций по выражениям лица человека // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2020. Т. 20, № 2. С. 163—176. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-163-176.
4. *Мубаракишина Р. Т., Яковенко Р. Т.* Обзор подходов к проблеме распознавания эмоций по параметрам устной речи // *Системный анализ в проектировании и управлении*. 2019. Т. 23, № 1. С. 392—397.
5. *Богданов А. Л., Дуля И. С.* Сентимент-анализ коротких русскоязычных текстов в социальных медиа // *Вестник Томского государственного университета. Экономика*. 2019. № 47. С. 220—241. DOI: 10.17223/19988648/47/17.
6. *Дюличева Ю. Ю.* Учебная аналитика MOOK как инструмент анализа математической тревожности // *Вопросы образования*. 2021. № 4. С. 243—265. DOI: 10.17323/1814-9545-2021-4-243-265.
7. *Adoma A. F., Henry N. M., Chen W.* Comparative analyses of bert, roberta, distilbert, and xlnet for text-based emotion recognition // 2020 17th Intern. Computer Conf. on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP). 2020. P. 117—121. DOI: 10.1109/iccwamtip51612.2020.9317379.
8. *Verkholyak O., Dvoynikova A., Karpov A.* A Bimodal Approach for Speech Emotion Recognition using Audio and Text // *J. Internet Serv. Inf. Secur.* 2021. Vol. 11, N 1. P. 80—96.

9. Liu Y., Fu G. Emotion recognition by deeply learned multi-channel textual and EEG features // *Future Generation Computer Systems*. 2021. Vol. 119. P. 1—6. DOI: 10.1016/j.future.2021.01.010.
10. Овсянникова В. В. К вопросу о классификации эмоций: категориальный и многомерный подходы // *Финансовая аналитика: проблемы и решения*. 2013. Т. 37, № 175. С. 43—48.
11. Ekman P. Basic emotions // *Handbook of cognition and emotion*. 1999. P. 45—60.
12. Изард К. Э. Психология эмоций. СПб: Питер, 1999. 464 с.
13. Sogancioglu G., Verkholyak O., Kaya H., Fedotov D., Cadée T., Salah A. A., Karpov A. Is Everything Fine, Grandma? Acoustic and Linguistic Modeling for Robust Elderly Speech Emotion Recognition // *INTERSPEECH*. 2020. P. 2097—2101. DOI: 10.21437/interspeech.2020-3160.
14. Russell J. A. Culture and the categorization of emotions // *Psychological bulletin*. 1991. Vol. 110, N 3. P. 426—450. DOI: 10.1037/0033-2909.110.3.426.
15. Двойникова А. А., Карпов А. А. Аналитический обзор подходов к распознаванию тональности русскоязычных текстовых данных // *Информационно-управляющие системы*. 2020. № 4(107). С. 20—30. DOI:10.31799/1684-8853-2020-4-20-30.
16. Henry E. R., Hofrichter J. Singular value decomposition: Application to analysis of experimental data // *Methods in enzymology*. Academic Press, 1992. Vol. 210. P. 129—192. DOI: 10.1016/0076-6879(92)10010-B.
17. Pennington J., Socher R., Manning C. D. Glove: Global vectors for word representation // *Proc. of the 2014 Conf. on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*. 2014. P. 1532—1543. DOI: 10.3115/v1/d14-1162.
18. Bojanowski P., Grave E., Joulin A., Mikolov T. Enriching word vectors with subword information // *Transactions of the association for computational linguistics*. 2017. Vol. 5. P. 135—146. DOI: 10.1162/tacl_a_00051.
19. Mikolov T., Sutskever I., Chen K., Corrado G. S., Dean J. Distributed representations of words and phrases and their compositionality // *Advances in neural information processing systems*. 2013. Vol. 26. P. 1—9.
20. Devlin J., Chang M. W., Lee K., Toutanova K. Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding // *arXiv preprint arXiv:1810.04805*. 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1810.04805.
21. Peters M., Neumann M., Iyyer M., Gardner M., Clark C., Lee K., Zettlemoyer L. Deep contextualized word representations // *Proc. of the 2018 Conf. of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*. 2018. Vol. 1. P. 2227—2237.
22. Halim L. R., Suryadibrata A. Cyberbullying Sentiment Analysis with Word2Vec and One-Against-All Support Vector Machine // *IJNMT (International Journal of New Media Technology)*. 2021. Vol. 8, N 1. P. 57—64. DOI: 10.31937/ijnmt.v8i1.2047.
23. Duong H. T., Nguyen-Thi T. A. A review: preprocessing techniques and data augmentation for sentiment analysis // *Computational Social Networks*. 2021. Vol. 8, N 1. P. 1—16. DOI: 10.1186/s40649-020-00080-x.
24. Perepelkina O., Kazimirova E., Konstantinova M. RAMAS: Russian multimodal corpus of dyadic interaction for affective computing // *Intern. Conf. on Speech and Computer*. Springer, Cham, 2018. P. 501—510. DOI: 10.1007/978-3-319-99579-3_52.
25. Двойникова А. А., Верхоляк О. В., Карпов А. А. Сентимент-анализ разговорной речи при помощи метода, основанного на тональных словарях // *Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО*. 2020. Т. 3. С. 75—80.
26. Zadeh A. B., Liang P. P., Poria S., Cambria E., Morency L. P. Multimodal language analysis in the wild: Cmumosei dataset and interpretable dynamic fusion graph // *Proc. of the 56th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. 2018. Vol. 1: Long Papers. P. 2236—2246. DOI: 10.18653/v1/p18-1208.

Сведения об авторах

Анастасия Александровна Двойникова

— Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, лаборатория речевых и многомодальных интерфейсов; мл. научный сотрудник; E-mail: dvoynikova.a@iias.spb.su

Кристина Олеговна Кондратенко

— бакалавр; Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра фонетики и методики преподавания иностранных языков; E-mail: st076959@student.spbu.ru

Поступила в редакцию 29.05.23; одобрена после рецензирования 07.06.23; принята к публикации 28.08.23.

REFERENCES

1. Acheampong F.A., Wenyu C., Nunoo-Mensah H. *Engineering Reports*, 2020, no. 7(2), pp. e12189, DOI: 10.1002/eng2.12189.
2. Dzedzickis A., Kaklauskas A., Bucinskas V. *Sensors*, 2020, no. 3(20), pp. 592, DOI: 10.3390/s20030592.
3. Ryumina E.V., Karpov A.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, no. 2(20), pp. 163–176, DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-163-176. (in Russ.)
4. Mubarakshina R.T., Yakovenko R.T. *Sistemnyy analiz v proyektirovani i upravlenii* (System Analysis in Design and Management), 2019, no. 1(23), pp. 392–397. (in Russ.)
5. Bogdanov A.L., Dulya I.S. *Tomsk State University Journal of Economics*, 2019, no. 47, pp. 220–241, DOI: 10.17223/19988648/47/17. (in Russ.)
6. Dyulicheva Yu. *Voprosy obrazovaniya* (Educational Studies), 2021, no. 4, pp. 243–265, DOI: 10.17323/1814-9545-2021-4-243-265. (in Russ.)
7. Adoma A.F., Henry N.M., Chen W. *17th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)*, 2020. pp. 117–121, DOI: 10.1109/iccwamtip51612.2020.9317379.
8. Verkholyak O., Dvoynikova A., Karpov A. *J. Internet Serv. Inf. Secur.*, 2021, no. 1(11), pp. 80–96.
9. Liu Y., Fu G. *Future Generation Computer Systems*, 2021, vol. 119, pp. 1–6, DOI: 10.1016/j.future.2021.01.010.
10. Ovsyannikova V.V. *Financial Analytics: Science and Experience*, 2013, no. 175(37), pp. 43–48. (in Russ.)
11. Ekman P. *Handbook of cognition and emotion*, 1999, pp. 45–60.
12. Izard C.E. *The psychology of emotions*, NY, London, Plenum Press, 1991.
13. Sogancioglu G., Verkholyak O., Kaya H., Fedotov D., Cadée T., Salah A. A., Karpov A. *INTERSPEECH*, 2020, pp. 2097–2101, DOI: 10.21437/interspeech.2020-3160.
14. Russell J.A. *Psychological bulletin*, 1991, no. 3(110), pp. 426–450, DOI: 10.1037/0033-2909.110.3.426.
15. Dvoynikova A.A., Karpov A.A. *Information and Control Systems*, 2020, no. 4(107), pp. 20–30, DOI: 10.31799/1684-8853-2020-4-20-30. (in Russ.)
16. Henry E.R., Hofrichter J. *Methods in enzymology*, Academic Press, 1992, vol. 210, pp. 129–192, DOI: 10.1016/0076-6879(92)10010-B.
17. Pennington J., Socher R., Manning C.D. *Proceedings of the 2014 conference on empirical methods in natural language processing (EMNLP)*, 2014, pp. 1532–1543, DOI: 10.3115/v1/d14-1162.
18. Bojanowski P., Grave E., Joulin A., Mikolov T. *Transactions of the association for computational linguistics*, 2017, vol. 5, pp. 135–146, DOI: 10.1162/tacl_a_00051.
19. Mikolov T., Sutskever I., Chen K., Corrado G.S., Dean J. *Advances in neural information processing systems*, 2013, vol. 26, pp. 1–9.
20. Devlin J., Chang M.W., Lee K., Toutanova K. *arXiv preprint arXiv:1810.04805*, 2018, DOI: 10.48550/arXiv.1810.04805.
21. Peters M., Neumann M., Iyyer M., Gardner M., Clark C., Lee K., Zettl-moyer L. *Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, 2018, vol. 1, pp. 2227–2237.
22. Halim L.R., Suryadibrata A. *IJNMT (International Journal of New Media Technology)*, 2021, no. 1(8), pp. 57–64, DOI: 10.31937/ijnmt.v8i1.2047.
23. Duong H.T., Nguyen-Thi T.A. *Computational Social Networks*, 2021, no. 1(8), pp. 1–16, DOI: 10.1186/s40649-020-00080-x.
24. Perepelkina O., Kazimirova E., Konstantinova M. *International Conference on Speech and Computer*, Springer, Cham, 2018, pp. 501–510, DOI: 10.1007/978-3-319-99579-3_52.
25. Dvoynikova A.A., Verkholyak O.V., Karpov A.A. *Almanac of Scientific Works of Young Scientists of ITMO University*, 2020, vol. 3, pp. 75–80. (in Russ.)
26. Zadeh A.B., Liang P.P., Poria S., Cambria E., Morency L.P. *Proceedings of the 56th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 2018, vol. 1, Long Papers, pp. 2236–2246, DOI: 10.18653/v1/p18-1208.

Data on authors

- Anastasia A. Dvoynikova** — St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, Speech and Multimodal Interfaces Laboratory; Junior Researcher;
E-mail: dvoynikova.a@iias.spb.su
- Khrystyna O. Kondratenko** — Bachelor; St. Petersburg State University, Department of Phonetics and Methods of Teaching Foreign Languages;
E-mail: st076959@student.spbu.ru

Received 29.05.23; approved after reviewing 07.06.23; accepted for publication 28.08.23.

**АДАПТИВНЫЕ НАБЛЮДАТЕЛИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ
НА ОСНОВЕ ПРОЦЕДУРЫ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ И СМЕШИВАНИЯ**

В. В. БЕСПАЛОВ*, А. А. ВЕДЯКОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
**vbespalov@itmo.ru*

Аннотация. Рассмотрена задача синтеза адаптивного наблюдателя переменных состояния нелинейных динамических систем. Получение корректной оценки компонентов вектора состояний при параметрической неопределенности — достаточно сложный процесс, необходимый, например, при решении ряда задач управления или диагностики. Процесс синтеза предложенного адаптивного наблюдателя разделен на два этапа. На первом этапе осуществляется параметризация нелинейной динамической системы, принадлежащей заранее определенному классу систем, приводимых к линейной по состоянию форме. На втором оцениваются неизвестные параметры на основе метода градиентного спуска и синтезируется градиентный наблюдатель переменных состояния.

Ключевые слова: адаптивный наблюдатель, параметризация нелинейной системы, линейные по состоянию формы, глобальная сходимость, оценка параметров

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, паспорт госзадания 2019-0898.

Ссылка для цитирования: Беспалов В. В., Ведяков А. А. Адаптивные наблюдатели для нелинейных систем на основе процедуры динамического расширения и смешивания // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 10. С. 828—833. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-828-833.

**ADAPTIVE OBSERVERS FOR NONLINEAR SYSTEMS BASED
ON DYNAMIC EXTENSION AND MIXING PROCEDURE**

V. V. Bespalov*, A. A. Vedyakov

ITMO University, St. Petersburg, Russia
vbespalov@itmo.ru

Abstract. The problem of synthesizing an adaptive observer of state variables of nonlinear dynamic systems is considered. Correct estimation of state vector components under parametric uncertainty is a rather complex process necessary e.g. for solving several problems of systems control and diagnostic. Synthesis of the proposed adaptive observer consists of two steps. In the first one, a parameterization of the nonlinear dynamical system, which can be transformed to a state affine form, is performed. In the second step, the unknown parameters are estimated based on the gradient descent method, and a gradient-based observer for the state variables is designed.

Keywords: adaptive observer, nonlinear system parameterization, affine state form, global convergence, parameter estimation

Acknowledgment: The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, state assignment passport 2019-0898.

For citation: Bespalov V. V., Vedyakov A. A. Adaptive observers for nonlinear systems based on dynamic extension and mixing procedure. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 10. P. 828—833 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-828-833.

Введение. Одним из популярных и актуальных направлений исследований в современной теории управления является разработка методов синтеза наблюдателей переменных состояния нелинейных динамических систем.

Большинство методов предполагает, что существует отображение, позволяющее свести систему к требуемому виду. Часть методов основана на построении линейной модели, схожей с линейной регрессией, для получения оценок состояний системы. Однако применимость таких методов зависит от ряда ограничений, связанных с допущениями, требующими существования такого отображения [1, 2].

В работе [3] представлен метод для систем, сводимых к каскадной форме. Основная идея метода заключается в том, что задача синтеза адаптивного наблюдателя сводится к оцениванию неизвестных параметров, связанных с начальными условиями неизвестных состояний системы. В работе [4] возможности метода расширены для систем, сводимых к линейной по состоянию форме. Указанный метод отличается простотой процедуры синтеза наблюдателя, однако он не позволяет получать оценки состояний напрямую.

В работе [5] предложен метод синтеза адаптивных наблюдателей, позволяющий получать оценку вектора состояний напрямую, но только для систем, сводимых к каскадной форме.

В настоящей работе на основе результатов, полученных в [4, 5], предлагается метод синтеза наблюдателя для систем, сводимых к линейной по состоянию форме, позволяющий напрямую получать оценку вектора состояний.

Постановка задачи. Рассматриваются нелинейные динамические системы вида:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), y(t), \theta_p), \quad y(t) = h(x(t), u(t)), \quad (1)$$

где $x(t) \in \mathbb{R}^n$ — неизвестный вектор состояния системы, $u := u(t) \in \mathbb{R}^m$ — сигнал управления, $y(t) := y \in \mathbb{R}^s$ — измеряемый выходной сигнал, $\theta_p \in \mathbb{R}^p$ — вектор неизвестных параметров.

Целью работы является синтез динамической системы вида

$$\dot{\zeta} = F_{\zeta}(y, \zeta, u, \hat{\theta}_p), \quad \dot{\hat{\theta}}_p = F_{\theta}(y, \zeta, u, \hat{\theta}_p), \quad \hat{x} = h(y, \zeta, u),$$

для которой гарантируется глобальная сходимость к нулю ошибки оценивания состояния $\tilde{x}(t) := x(t) - \hat{x}(t)$ и ошибки оценивания вектора неизвестных параметров $\tilde{\theta}_p(t) := \theta_p - \hat{\theta}_p(t)$ для любых начальных условий $x(0) \in \mathbb{R}^n$, где $\zeta(t) \in \mathbb{R}^{n_{\zeta}}$ и $\chi(t) \in \mathbb{R}^q$ — внутренние переменные системы, которые формально определены далее, $\hat{x}(t), \hat{\theta}_p(t)$ — оценки вектора состояний и неизвестных параметров соответственно.

Допущение 1. Для нелинейной динамической системы вида (1) существует *инъективное* гладкое отображение $\chi(t) = \phi(x(t)) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^q$, преобразующее ее к линейной по состоянию форме:

$$\dot{\chi}(t) = \Lambda(y, u)\chi(t) + H(y, u)\theta_p + w(y, u), \quad (2)$$

где $\chi(t) \in \mathbb{R}^q$ — образ неизвестного вектора состояния $x(t)$; $\Lambda(y, u) \in \mathbb{R}^{q \times q}$ — известная, в частном случае — стационарная, матрица; $H(y, u) \in \mathbb{R}^{q \times p}$ и $w(y, u) \in \mathbb{R}^q$ — известные гладкие функции.

Допущение 2. Существует алгебраическое соотношение, связывающее образы координат вектора состояния системы с известными гладкими функциями $\phi(y, u) : \mathbb{R}^s \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^{l+q}$ и $c(y, u) : \mathbb{R}^s \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$:

$$\varphi^T(y, u) \begin{bmatrix} \theta_l \\ \chi(t) \end{bmatrix} = c(y, u), \quad (3)$$

где $\theta_l \in \mathbb{R}^l$ — вектор неизвестных параметров.

Допущение 3. Сигнал управления $u(t)$ обеспечивает ограниченность траекторий нелинейной системы (1).

Параметризация модели. Первый случай. Пусть в соотношении (2) матрица состояний $\Lambda(y, u)$ — известная нестационарная, причем выполняется следующее допущение.

Допущение 4. Решения динамической системы $\dot{z}(t) = \Lambda(y, u)z(t)$ ограничены.

Утверждение 1. Нелинейная динамическая модель (1), удовлетворяющая допущениям 1—4, совместно с вспомогательными переменными, являющимися решениями следующих дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= \Lambda(y, u)z(t) + w(y, u), \quad z(0) = 0, \\ \dot{\Omega}(t) &= \Lambda(y, u)\Omega(t) + H(y, u), \quad \Omega(0) = 0, \end{aligned}$$

приводима к линейной модели

$$\zeta(y, u) = \psi(y, u) \text{col}[\theta_l; \chi(t); e(0); \theta_p], \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \zeta(y, u) &:= c_f(y, u) + \frac{1}{p+\alpha} [\varphi_{\mathcal{X}f}^T(y, u)w(y, u)] + z^T(t) \frac{1}{p+\alpha} [\Lambda^T(y, u)\varphi_{\mathcal{X}f}(y, u)] - \\ &- \frac{1}{p+\alpha} \left[(\Lambda(y, u)z(t) + w(y, u) + \Lambda(y, u)\Omega(t))^T \frac{1}{p+\alpha} [\Lambda^T(y, u)\varphi_{\mathcal{X}f}(y, u)] \right], \\ \psi(y, u) &:= [\psi_l^T(t) \quad \psi_\chi^T(t) \quad \psi_0^T(t) \quad \psi_p^T(t)], \end{aligned}$$

компоненты регрессора $\psi(y, u)$ определены как

$$\begin{aligned} \psi_l(t) &:= \varphi_{lf}(y, u), \quad \psi_\chi(t) := \varphi_{\mathcal{X}f}(y, u), \\ \psi_0(t) &:= + \frac{1}{p+\alpha} [\varphi_{\mathcal{X}f}^T(y, u)(\Lambda(y, u))] \Phi_\Lambda(y, u) - \\ &- \frac{1}{p+\alpha} \left[\frac{1}{p+\alpha} [\varphi_{\mathcal{X}f}^T(y, u)(\Lambda(y, u))] \dot{\Phi}_\Lambda(y, u) \right], \\ \psi_p(t) &:= - \frac{1}{p+\alpha} [\varphi_{\mathcal{X}f}^T(y, u)H(y, u)] - \frac{1}{p+\alpha} [\varphi_{\mathcal{X}f}^T(y, u)(\Lambda(y, u))] \Omega(t) - \\ &- \frac{1}{p+\alpha} \left[\frac{1}{p+\alpha} [\varphi_{\mathcal{X}f}^T(y, u)(\Lambda(y, u))] (\Lambda(y, u)\Omega(t) + H(y, u)) \right]. \end{aligned}$$

Параметризация модели. Второй случай. Пусть нелинейная динамическая система (1) приводима к линейной по состоянию форме (2), в которой матрица состояний является стационарной $\Lambda(y, u) = \Lambda$, и выполняются допущения.

Допущение 5. Для измеряемого сигнала выхода системы $y(t) = C\chi(t)$, где $C \in \mathbb{R}^{s \times q}$ — известная матрица.

Допущение 6. Пара матриц (Λ, C) является полностью наблюдаемой.

Утверждение 2. Нелинейная динамическая модель (1), удовлетворяющая допущениям 1—3 и 5—6, совместно с вспомогательными переменными, являющимися решениями следующих дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{z}_1(t) &= \bar{\Lambda}z_1(t) + Ly(t), \quad z_1(0) = 0; \\ \dot{z}_2(t) &= \bar{\Lambda}z_2(t) + w(y, u), \quad z_2(0) = 0; \\ \dot{\Omega}(t) &= \bar{\Lambda}\Omega(t) + H(y, u), \quad \Omega(0) = 0,\end{aligned}$$

где $\bar{\Lambda} \in \mathbb{R}^{q \times q} : \bar{\Lambda} = \Lambda - LC$, $L \in \mathbb{R}^{q \times s}$ — настраиваемая матрица, приводима к линейной модели

$$\varsigma(y, u) = \psi(y, u) \begin{bmatrix} \theta_l & \chi(t) & e(0) & \theta_p \end{bmatrix}^T, \quad (5)$$

$$\varsigma(y, u) := c_f(y, u) + \frac{1}{p + \alpha} \left[\Phi_{\chi}^T(y, u) w(y, u) + \Phi_{\chi}^T(y, u) \Lambda(z_1(t) + z_2(t)) \right],$$

$$\psi(y, u) := \begin{bmatrix} \Psi_l^T(t) & \Psi_{\chi}^T(t) & \Psi_0^T(t) & \Psi_p^T(t) \end{bmatrix},$$

компоненты регрессора $\psi(y, u)$ определены как

$$\Psi_l(t) := \Phi_{lf}(y, u), \quad \Psi_{\chi}(t) := \Phi_{\chi f}(y, u), \quad \Psi_0(t) := \frac{1}{p + \alpha} \left[\Phi_{\chi}^T(y, u) e^{\bar{\Lambda}t} \right],$$

$$\Psi_p(t) := -\frac{1}{p + \alpha} \left[\Phi_{\chi}^T(y, u) H(y, u) \right] - \frac{1}{p + \alpha} \left[\Phi_{\chi}^T(y, u) \Lambda \Omega(t) \right].$$

Доказательство утверждений 1 и 2 может быть построено следующим образом. К алгебраическому соотношению (3) применяется линейный устойчивый фильтр $\frac{\alpha}{p + \alpha}$, где $\alpha > 0$,

$p := \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования, благодаря чему становится возможным применить

лемму о перестановках [6, 7]. В получившемся выражении выполняется замена величины $\dot{\chi}(t)$ согласно соотношению (2). После этого, по аналогии с [4], вводится соответствующий набор вспомогательных переменных для формирования сигнала ошибки. Полученная модель ошибки позволяет произвести замену величин $\dot{\chi}(t)$ и $\chi(t)$ и перейти к линейной модели требуемого вида с использованием леммы о перестановках.

Метод синтеза адаптивного наблюдателя. После того как нелинейная система (1) преобразована к линейной модели (4) или (5), возможно построить алгоритм оценивания неизвестных параметров и переменных состояния. Для этого используется $N = l + 2q + p$ различных значений параметра $\alpha_i > 0$, $i = 1, \dots, N$, чтобы сформировать набор линейных моделей:

$$\varsigma(y, u, \alpha_i) = \psi(y, u, \alpha_i) \text{col} \begin{bmatrix} \theta_l; \chi; e(0); \theta_p \end{bmatrix}.$$

Полученные линейные модели объединяются в „расширенную“ модель:

$$\Sigma(t) := \begin{bmatrix} \varsigma(y, u, \alpha_1) \\ \varsigma(y, u, \alpha_2) \\ \dots \\ \varsigma(y, u, \alpha_N) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^N, \quad \Psi(t) := \begin{bmatrix} \psi(y, u, \alpha_1) \\ \psi(y, u, \alpha_2) \\ \dots \\ \psi(y, u, \alpha_N) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N \times N}. \quad (6)$$

На следующем этапе выполняется процедура „смешивания“ [5], в результате которой линейная модель (6) преобразуется к виду

$$Z(t) = \Delta(t) \text{col} \begin{bmatrix} \theta_l; \chi; e(0); \theta_p \end{bmatrix},$$

где измеряемые сигналы $Z(t)$ и $\Delta(t)$ определены следующим образом:

$$Z(t) := \text{adj}(\Psi(t))\Sigma(t), \quad \Delta(t) := \det(\Psi(t)).$$

Если $\Delta(t)$ удовлетворяет условию интервального возбуждения [6], оценку неизвестного параметра θ_p можно сформировать по методу, описанному в работе [5].

Утверждение 3. Наблюдатель переменных состояния

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\chi}}(t) &= \Lambda(y, u)\hat{\chi}(t) + H(y, u)\hat{\theta}_p^{\text{FTCO}} + w(y, u) + \gamma_\chi \Delta(t)(Z_\chi(t) - \hat{\chi}(t)\Delta(t)), \\ \hat{x}(t) &= \phi^L(\hat{\chi}(t)) \end{aligned} \quad (7)$$

нелинейной динамической системы (1), приводимой к линейной модели (4) или (5), где γ_χ — настраиваемый параметр, $\hat{\theta}_p^{\text{FTCO}}$ — оценка неизвестного параметра θ_p , построенная аналогично [5], обеспечивает экспоненциальную сходимость ошибки оценивания неизвестного вектора состояний $x(t)$ к нулю:

$$|\tilde{x}(t)| \leq \mu e^{-\beta t} |\tilde{x}(0)|, \quad \mu, \beta > 0, \quad (8)$$

при условии, что $\Delta(t) \notin \mathcal{L}_2: \int_0^\infty \Delta^2(t) dt = \infty$, отображение $\phi^L(\chi)$ удовлетворяет условию Липшица: $\exists L > 0: |\phi^L(\chi_1) - \phi^L(\chi_2)| \leq L|\chi_1(t) - \chi_2(t)|$, а матрица $\Lambda(y, u)$ такая, что

$$\exists \delta > 0, T > 0: \int_t^{t+T} (\Lambda(\tau) - \gamma_\chi \Delta^2(\tau) I_q) d\tau \leq -\delta I_q, \quad (9)$$

где $I_q \in \mathbb{R}^{q \times q}$ — единичная матрица.

Для доказательства утверждения 3 необходимо сформировать динамическую модель ошибки оценивания $\tilde{\chi}(t) = \hat{\chi}(t) - \chi(t)$ с учетом полученной оценки вектора неизвестных параметров. Поскольку ошибка оценивания вектора неизвестных параметров сходится к нулю за конечное время, становится возможным упростить модель ошибки оценивания вектора состояний. Учитывая неравенство (9), можно сделать вывод об экспоненциальной сходимости ошибки оценивания вектора состояний к нулю, на основании результата, описанного в [8]. Согласно допущению 1, существует левое обратное отображение $\phi^L(\hat{\chi})$, удовлетворяющее условию Липшица, из чего можно показать, что неравенство (8) выполнено, следовательно, доказательство завершено.

Заключение. В работе представлен метод синтеза адаптивных наблюдателей нелинейных динамических систем, приводимых к линейной по состоянию форме. Предложен способ параметризации таких систем к линейной модели. Аналогично методу, описанному в [5], осуществляется преобразование полученной модели, после чего с помощью метода градиентного спуска синтезируется алгоритм оценивания неизвестных параметров со свойством сходимости ошибки оценивания к нулю за конечное время. Затем формируется корректирующее слагаемое и конструируется наблюдатель переменных состояния, обеспечивающий экспоненциальную сходимость ошибки оценивания переменного состояния к нулю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kazantzis N. and Kravaris C. Nonlinear observer design using Lyapunov's auxiliary theorem // Proc. of the 36th IEEE Conf. on Decision and Control. San Diego, CA, USA, 1997. Vol. 5. P. 4802—4807. DOI: 10.1109/CDC.1997.649779.

2. *Andrieu V. and Praly L.* On the Existence of a Kazantzis-Kravaris/Luenberger Observer // *SIAM Journal on Control and Optimization*. 2006. Vol. 24, N 5. P. 432—456.
3. *Ortega R., Bobtsov A., Pyrkin A., Aranovskiy S.* A parameter estimation approach to state observation of nonlinear systems // *Systems & Control Letters*. 2015. Vol. 85. P. 84—94. ISSN 0167-6911. <https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2015.09.008>.
4. *Ortega R., Bobtsov A., Nikolaev N., Schiffer J.* Generalized parameter estimation-based observers: Application to power systems and chemical–biological reactors // *Automatica*. 2021. Vol. 129. P. 109635. ISSN 0005-1098. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2021.109635>.
5. *Pyrkin A., Bobtsov A., Ortega R., Vedyakov A., Aranovskiy S.* Adaptive state observers using dynamic regressor extension and mixing // *Systems & Control Letters*. 2019. Vol. 133. P. 104519. ISSN 0167-6911. <https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2019.104519>.
6. *Sastry S., Bodson M.* Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989.
7. *Kreisselmeier G., Rietze-Augst G.* Richness and excitation on an interval— with application to continuous-time adaptive control // *IEEE, Trans. Automat. Control*. 1990. Vol. 2, N 35. P. 165—171.
8. *Афанасьев В. Н., Колмановский В. Б., Носов В. Р.* Математическая теория конструирования систем управления. М.: Высш. шк., 2003. ISBN: 5-06-004162-X.

Сведения об авторах

- Владимир Владимирович Беспалов** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: vvbeshpalov@itmo.ru
- Алексей Алексеевич Ведяков** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: vedyakov@itmo.ru

Поступила в редакцию 01.06.23; одобрена после рецензирования 14.06.23; принята к публикации 28.08.23.

REFERENCES

1. Kazantzis N. and Kravaris C. *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, CA, USA, 1997, vol. 5, pp. 4802–4807, DOI: 10.1109/CDC.1997.649779.
2. Andrieu V. and Praly L. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2006, no. 45(2), pp. 432–456.
3. Ortega R., Bobtsov A., Pyrkin A., Aranovskiy S. *Systems & Control Letters*, 2015, vol. 85, pp. 84–94, ISSN 0167-6911, <https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2015.09.008>.
4. Ortega R., Bobtsov A., Nikolaev N., Schiffer J. *Automatica*, 2021, vol. 129, pp. 109635, ISSN 0005-1098, <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2021.109635>.
5. Pyrkin A., Bobtsov A., Ortega R., Vedyakov A., Aranovskiy S. *Systems & Control Letters*, 2019, vol. 133, pp. 104519, ISSN 0167-6911, <https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2019.104519>.
6. Sastry S., Bodson M. *Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1989.
7. Kreisselmeier G., Rietze-Augst G. *IEEE Trans. Automat. Control*, 1990, no. 35(2), pp. 165–171.
8. Afanasyev V.N., Kolmanovsky V.B., Nosov V.R. *Matematicheskaya teoriya konstruirovaniya sistem upravleniya* (Mathematical Theory of Design of Control Systems), Moscow, 2003, ISBN: 5-06-004162-X. (in Russ.)

Data on authors

- Vladimir V. Beshpalov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: vvbeshpalov@itmo.ru
- Alexey A. Vedyakov** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: vedyakov@itmo.ru

Received 01.06.23; approved after reviewing 14.06.23; accepted for publication 28.08.23.

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КВАДРОКОПТЕРА
В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

С. А. КИМ*, А. А. ПЫРКИН, О. И. БОРИСОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия,
skim@itmo.ru

Аннотация. Получена полная модель движения квадрокоптера для задачи динамического позиционирования в точке. На основе этой модели предложены два алгоритма управления. Первый обобщает ранее полученные результаты на случай изменяющегося угла рыскания. Второй алгоритм управления решает поставленную задачу на основе упрощенной методики настройки регулятора.

Ключевые слова: робастное управление, управление движением квадрокоптера, динамическое позиционирование, согласованное управление, геометрический подход

Благодарности: работа поддержана грантом Президента Российской Федерации № МД-3574.2022.4 и Министерством науки и высшего образования РФ (паспорт госзадания № 2019-0898).

Ссылка для цитирования: Ким С. А., Пыркин А. А., Борисов О. И. Алгоритмы управления движением квадрокоптера в режиме динамического позиционирования // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 10. С. 834—844. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-834-844.

ALGORITHMS FOR CONTROLLING A QUADROPTER MOVEMENT IN DYNAMIC POSITIONING MODE

S. A. Kim*, A. A. Pyrkin, O. I. Borisov

*ITMO University, St. Petersburg, Russia
skim@itmo.ru

Abstract. A complete model of quadcopter motion is obtained for the problem of dynamic positioning at a point, on the basis of which two control algorithms are proposed. The first generalizes the previously obtained results to the case of a changing yaw angle. The second control algorithm solves the problem on the base of a simplified technique for tuning the controller.

Keywords: robust control, quadrotor motion control, dynamic positioning, coordinated control, geometric approach

Acknowledgment: The work was supported by a grant from the President of the Russian Federation No. MD-3574.2022.4 and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment passport No. 2019-0898).

For citation: Kim S. A., Pyrkin A. A., Borisov O. I. Algorithms for controlling a quadcopter movement in dynamic positioning mode. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 10. P. 834—844 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-834-844.

Введение. Ввиду нелинейной динамики, многосвязной структуры и наличия неопределенностей задача управления движением квадрокоптера является сложной и поэтому сохраняет

актуальность. Классическим подходом является линеаризация модели с целью упрощения синтеза регулятора, однако такой подход является довольно грубым и вследствие модельных неточностей не всегда обеспечивает удовлетворительное качество переходных процессов. Известны решения, в которых рассматривается нелинейная модель движения, например [1, 2], однако и такие работы не лишены недостатков. В них используется неполная модель движения, которая не учитывает динамику угла рыскания. Кроме того, предложенные алгоритмы управления предполагают неочевидную методику настройки, при которой значения параметров регулятора должны быть выбраны из соблюдения условий, связанных с доказательством утверждений.

В настоящей работе учтены выявленные недостатки, в результате чего получена полная модель движения квадрокоптера для задачи динамического позиционирования в точке, на основе которой предложены два алгоритма управления: 1) обобщающий результат [1] на случай изменяющегося угла рыскания; 2) динамический алгоритм управления с упрощенной методикой настройки регулятора.

Модель движения квадрокоптера в нестационарной нормальной форме. Модель движения в пространстве имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} a_x & 0 & 0 \\ 0 & a_y & 0 \\ 0 & 0 & a_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} + \frac{1}{m} \begin{bmatrix} \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi \\ \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix} \left(\sum_{i=1}^4 F_i \right) - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} a_\psi & 0 & 0 \\ 0 & a_\theta & 0 \\ 0 & 0 & a_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\ell}{J_\psi} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\ell}{J_\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{C}{J_\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix},$$

где x, y, z — декартовы координаты центра масс; ϕ, θ, ψ — углы рыскания, тангажа и крена; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; m — масса; $F_i, i = 1—4$ — подъемные силы роторов; ℓ — расстояние между центром тяжести и роторами; J_ψ, J_θ, J_ϕ — моменты инерции; C — коэффициент пропорциональности; параметры a с соответствующими индексами в каждом динамическом канале означают коэффициенты вязкого трения. Поскольку силы F_i достаточно малы в нормальном режиме работы квадрокоптера, характеризуемом низкими скоростями движения, далее будем пренебрегать этим компонентом уравнения динамики. Заметим, что наличие в рассмотрении дополнительного компонента только сделает запись выражений более громоздкой, не влияя при этом на основной результат.

Введем в рассмотрение вспомогательные переменные

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C}{J_\phi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\ell}{J_\psi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\ell}{J_\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

и перепишем полную динамическую модель движения робота в пространстве в более компактном виде

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi \\ \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix} (u_1 + g) - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \\ u_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Рассмотрим следующее утверждение.

Утверждение 1. Модель (1)–(3) может быть представлена в виде каскада систем в нормальной форме с нестационарными матричными коэффициентами в цепочке интеграторов

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_1 &= \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 &= q_1(\xi) + b_1(\xi) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_3 &= \xi_4, \\ \dot{\xi}_4 &= \beta(t) \xi_5, \\ \dot{\xi}_5 &= \xi_6, \end{aligned}$$

$$\dot{\xi}_6 = q_2(\xi) + b_{21}(\xi)u_2 + b_{22}(\xi) \begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \end{bmatrix},$$

где $\xi = \text{col}(\xi_1, \dots, \xi_6)$ — вектор переменных состояния в новом базисе, переменные матрицы соответствующих размерностей q_1 , b_1 , q_2 , b_{21} , b_{22} ; $\beta(t)$ — положительный коэффициент, удовлетворяющий условию

$$0 < \beta_{\min} \leq \beta(t) \leq \beta_{\max}. \quad (4)$$

Запишем модель движения квадрокоптера в отклонениях от заданного положения ориентации и представим решение задачи стабилизации квадрокоптера в заданной точке пространства при отсутствии внешних возмущений. Регулируемыми переменными в этом случае будут линейные координаты в пространстве и угол рысканья:

$$Y = \text{col}(z, \phi, x, y) = \text{col}(\xi_1, \xi_3).$$

Заданное положение квадрокоптера в пространстве описывается вектором постоянных значений

$$Y^* = \text{col}(z^*, \phi^*, x^*, y^*)$$

(„звездочкой“ обозначено заданное значение соответствующей переменной), а также нулевые значения крена и тангажа:

$$\psi^* = 0 \text{ и } \theta^* = 0.$$

Введем в рассмотрение вектор ошибок стабилизации:

$$\begin{aligned} \tilde{\xi}_1 &= \begin{bmatrix} \tilde{\xi}_{11} \\ \tilde{\xi}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z - z^* \\ \phi - \phi^* \end{bmatrix} = \xi_1 - \begin{bmatrix} z^* \\ \phi^* \end{bmatrix}, \quad \tilde{\xi}_2 = \xi_2, \\ \tilde{\xi}_3 &= \begin{bmatrix} \tilde{\xi}_{31} \\ \tilde{\xi}_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - x^* \\ y - y^* \end{bmatrix} = \xi_3 - \begin{bmatrix} x^* \\ y^* \end{bmatrix}, \quad \tilde{\xi}_4 = \xi_4, \\ \tilde{\xi}_5 &= \xi_5, \quad \tilde{\xi}_6 = \xi_6 \end{aligned}$$

и, пользуясь утверждением 1, найдем динамическую модель движения квадрокоптера в отклонениях от заданного положения и ориентации:

$$\dot{\tilde{\xi}}_1 = \tilde{\xi}_2,$$

$$\dot{\tilde{\xi}}_2 = q_1(\psi, \theta) + b_1(\psi, \theta) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \tag{5}$$

$$\dot{\tilde{\xi}}_3 = \tilde{\xi}_4,$$

$$\dot{\tilde{\xi}}_4 = \beta(t) \tilde{\xi}_5, \tag{6}$$

$$\dot{\tilde{\xi}}_5 = \tilde{\xi}_6,$$

$$\dot{\tilde{\xi}}_6 = q_2(\phi, \psi, \theta, \dot{\phi}, \dot{\psi}, \dot{\theta}) + b_{21}(\phi, \psi, \theta)u_2 + b_{22}(\phi, \psi, \theta) \begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Целью синтеза закона управления является выбор регуляторов u_1, u_2, u_3, u_4 таких, чтобы нулевое положение равновесия $\tilde{\xi} = \text{col}(\tilde{\xi}_1, \tilde{\xi}_2, \tilde{\xi}_3, \tilde{\xi}_4, \tilde{\xi}_5, \tilde{\xi}_6) = 0$ было асимптотически устойчивым.

Алгоритм управления по состоянию в задаче стабилизации угла рыскания и высоты. Допустим, что вектор переменных (т.е. положение робота, ориентация, а также его линейные и угловые скорости) состояния $\tilde{\xi}$ доступен для измерения.

Закон управления (u_1, u_2) можем выбрать на основе модели (5) методом линеаризации обратной связью:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = b_1(\psi, \theta)^{-1} \left[-q_1(\psi, \theta) - K_1 \tilde{\xi}_1 - K_2 \tilde{\xi}_2 \right],$$

где матрицы $K_1 = \text{diag}(k_{11}, k_{12}) > 0$, $K_2 = \text{diag}(k_{21}, k_{22}) > 0$ выбираются исходя из заданных показателей качества.

В этом случае для замкнутой системы имеем

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_2 \\ -K_1 & -K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix},$$

где $I_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ обозначает единичную матрицу размерности 2. Назначая собственные желаемые числа матрицы F , можно однозначно выбрать параметры регуляторов K_1 и K_2 . Перегруппировав переменные вектора состояния, можно получить более удобную для синтеза модель замкнутой системы:

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_{11} \\ \dot{\xi}_{21} \\ \dot{\xi}_{12} \\ \dot{\xi}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_{11} & -k_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -k_{21} & -k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{11} \\ \xi_{21} \\ \xi_{12} \\ \xi_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & 0 \\ 0 & F_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{11} \\ \xi_{21} \\ \xi_{12} \\ \xi_{22} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где благодаря блочно-диагональной структуре матрицы состояния показатели качества переходных процессов в контуре высоты z и угла рысканья ϕ могут быть настроены независимо друг от друга путем соответствующего выбора параметров матриц K_1 и K_2 .

Заметим также, что благодаря известной структуре матриц q_1 и b_1 закон управления может быть переписан в виде

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\cos \theta \cos \psi} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} g(1 - \cos \theta \cos \psi) \\ 0 \end{bmatrix} - K_1 \tilde{\xi}_1 - K_2 \tilde{\xi}_2 \right)$$

или более точно:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g \left(\frac{1}{\cos \theta \cos \psi} - 1 \right) + \frac{1}{\cos \theta \cos \psi} (-k_{11} \tilde{\xi}_{11} - k_{21} \tilde{\xi}_{21}) \\ -k_{12} \tilde{\xi}_{12} - k_{22} \tilde{\xi}_{22} \end{bmatrix}.$$

Видно, что контур угла рысканья может быть стабилизирован независимым ПД-регулятором:

$$u_2 = -k_{12} \tilde{\xi}_{12} - k_{22} \tilde{\xi}_{22}. \quad (9)$$

В контуре высоты необходимо наложить ограничение на сигнал u_1 , обеспечив условие (4). Пусть номинальный регулятор высоты имеет вид ПД-регулятора с ограничением по уровню:

$$u_1 = \text{sat}_L \left(\frac{1}{\cos \theta \cos \psi} (g - k_{11} \tilde{\xi}_{11} - k_{21} \tilde{\xi}_{21}) - g \right),$$

где функция $\text{sat}_L(\cdot)$ означает насыщение с уровнем L . При $L = \alpha g$ со вспомогательным параметром $\alpha < 1$ обеспечивается условие (4):

$$0 < 1 - \alpha \leq \beta(t) \leq 1 + \alpha.$$

В этом случае динамика замкнутого контура высоты будет иметь вид

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_{11} \\ \dot{\xi}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\xi}_{11} \\ \tilde{\xi}_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cos \theta \cos \psi \text{sat}_L \left(\frac{1}{\cos \theta \cos \psi} (g - k_{11} \tilde{\xi}_{11} - k_{21} \tilde{\xi}_{21}) - g \right),$$

откуда можно показать локальную устойчивость по входу:

$$\ddot{z} + k_{21} \dot{z} + k_{11} z = g(1 - \cos \theta \cos \psi),$$

где входом является функция крена θ и тангажа ψ , равная нулю при равновесном состоянии $\theta = 0$ и $\psi = 0$.

Однако это свойство справедливо только для тех углов крена и тангажа, при которых аргумент функции насыщения в управлении совпадает с ее выходным значением:

$$\text{sat}_L \left(\frac{1}{\cos \theta \cos \psi} (g - k_{11} \tilde{\xi}_{11} - k_{21} \tilde{\xi}_{21}) - g \right) = \frac{1}{\cos \theta \cos \psi} (g - k_{11} \tilde{\xi}_{11} - k_{21} \tilde{\xi}_{21}) - g.$$

Тогда можно найти ограничение на углы крена и тангажа, приняв $\tilde{\xi}_{11} = 0$ и $\tilde{\xi}_{21} = 0$ в положении равновесия

$$-\alpha g \leq \frac{1}{\cos \theta \cos \psi} g - g \leq \alpha g,$$

откуда получим необходимое условие

$$\frac{1}{1 - \alpha} \geq \cos \theta \cos \psi \geq \frac{1}{1 + \alpha}.$$

Поскольку $\alpha < 1$, то $\frac{1}{1 - \alpha} > 1$, и левым неравенством можно пренебречь. Таким образом, имеем условие

$$\cos \theta \cos \psi \geq \frac{1}{1 + \alpha},$$

физический смысл которого заключается в том, что ограниченного управляющего воздействия достаточно, чтобы в положении равновесия вблизи заданной высоты сбалансировать силы, возникающие при отклонении крена и дифферента.

Алгоритм управления по состоянию в задаче стабилизации координат робота в горизонтальной плоскости. Выберем закон управления (u_3, u_4) на основе модели (6), (7) методом линеаризации обратной связию:

$$\begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = b_{22}(\phi, \psi, \theta)^{-1} \left[-q_2(\phi, \psi, \theta, \dot{\phi}, \dot{\psi}, \dot{\theta}) - b_{21}(\phi, \psi, \theta) u_2 - K_3 \tilde{\xi}_3 - K_4 \tilde{\xi}_4 - K_5 \tilde{\xi}_5 - K_6 \tilde{\xi}_6 \right],$$

где матрицы $K_3 = \text{diag}(k_{31}, k_{32}) > 0$, $K_4 = \text{diag}(k_{41}, k_{42}) > 0$, $K_5 = \text{diag}(k_{51}, k_{52}) > 0$, $K_6 = \text{diag}(k_{61}, k_{62}) > 0$ выбираются исходя из заданных показателей качества специальным образом (см. ниже), сигнал управления u_2 определен в выражении (9). Для замкнутого контура системы (6), (7) получим

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{\xi}}_3 \\ \dot{\tilde{\xi}}_4 \\ \dot{\tilde{\xi}}_5 \\ \dot{\tilde{\xi}}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta(t) I_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_2 \\ -K_3 & -K_4 & -K_5 & -K_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\xi}_3 \\ \tilde{\xi}_4 \\ \tilde{\xi}_5 \\ \tilde{\xi}_6 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Заметим, что матрица состояния в (10) является нестационарной, это значит, что вопрос выбора коэффициентов обратной связи нетривиален и требует отдельного рассмотрения.

Перепишем (10), перегруппировав вектор переменных состояния аналогично выражению (8):

$$\begin{bmatrix} \xi_{31} \\ \xi_{41} \\ \xi_{51} \\ \xi_{61} \\ \xi_{32} \\ \xi_{42} \\ \xi_{52} \\ \xi_{62} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_{31} & -k_{41} & -k_{51} & -k_{61} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{32} & -k_{42} & -k_{52} & -k_{62} \end{bmatrix}}_{F_{34}} \begin{bmatrix} \xi_{31} \\ \xi_{41} \\ \xi_{51} \\ \xi_{61} \\ \xi_{32} \\ \xi_{42} \\ \xi_{52} \\ \xi_{62} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Матрица состояния $F_{34} = \begin{bmatrix} F_3 & 0 \\ 0 & F_4 \end{bmatrix}$ является блочно-диагональной:

$$F_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_{31} & -k_{41} & -k_{51} & -k_{61} \end{bmatrix}, \quad F_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_{32} & -k_{42} & -k_{52} & -k_{62} \end{bmatrix},$$

и ее гурвицевость (асимптотическая устойчивость системы с такой матрицей состояния) определяется гурвицевостью матриц F_3 и F_4 .

Поскольку, согласно выражению (4), параметр $\beta(t)$ ограничен и сверху, и снизу известными положительными числами, можно выбрать постоянные параметры k так, чтобы обеспечить асимптотическую устойчивость нулевого положения равновесия в системе (11) или (10). Подобное утверждение может быть найдено в статьях [1, 2], доказательство которого может быть получено на основе доказательства расширенной версии леммы Даяванца [3, 4]. Наиболее близкий результат вычисления матрицы K представлен в работе [5] с помощью метода бэкстепинг. Далее покажем доказательство утверждения, определяющего способ выбора стабилизирующей обратной связи.

Утверждение 2. Рассмотрим вспомогательную систему вида

$$\begin{aligned} \dot{\chi}_1 &= \chi_2, \\ \dot{\chi}_2 &= \beta(t)\chi_3, \\ \dot{\chi}_3 &= \chi_4, \\ \dot{\chi}_4 &= u, \end{aligned}$$

где $\chi = \text{col}(\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4) \in R^4$, переменный коэффициент $\beta(t)$ удовлетворяет двойному неравенству (4). Существует вектор постоянных параметров $\kappa = \text{col}(\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4)$ такой, что закон управления

$$u = \kappa^T \chi \quad (12)$$

обеспечивает асимптотическую устойчивость положения равновесия $\chi = 0$ при любых начальных условиях $\chi(0)$.

Доказательство утверждения 2. Рассмотрим замену переменных, следуя методу бэкстепинг:

$$y_1 = \chi_1,$$

$$\begin{aligned} y_2 &= \chi_2 + \alpha_1 \chi_1, \\ y_3 &= \chi_3 + \alpha_2 y_2, \\ y_4 &= \chi_4 + \alpha_3 y_3. \end{aligned}$$

Тогда в новом базисе (y_1, y_2, y_3, y_4) система примет вид

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= -\alpha_1 y_1 + y_2, \\ \dot{y}_2 &= -\alpha_1^2 y_1 + (\alpha_1 - \alpha_2 \beta) y_2 + \beta y_3, \\ \dot{y}_3 &= -\alpha_1^2 \alpha_2 y_1 + \alpha_2 (\alpha_1 - \alpha_2 \beta) y_2 + (\alpha_2 \beta - \alpha_3) y_3 + y_4, \\ \dot{y}_4 &= -\alpha_1^2 \alpha_2 \alpha_3 y_1 + \alpha_2 \alpha_3 (\alpha_1 - \alpha_2 \beta) y_2 + \alpha_3 (\alpha_2 \beta - \alpha_3) y_3 + \alpha_3 y_4 + u. \end{aligned}$$

Выберем закон управления $u = -\alpha_4 y_4$, что соответствует формуле (12), где

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= -\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4, \\ \kappa_2 &= -\alpha_2 \alpha_3 \alpha_4, \\ \kappa_3 &= -\alpha_3 \alpha_4, \\ \kappa_4 &= -\alpha_4. \end{aligned}$$

Тогда для замкнутой системы получим

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \end{bmatrix} = \Phi \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

с матрицей состояния Φ , имеющей вид

$$\Phi = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 1 & 0 & 0 \\ -\alpha_1^2 & \alpha_1 - \alpha_2 \beta & \beta & 0 \\ -\alpha_1^2 \alpha_2 & \alpha_2 (\alpha_1 - \alpha_2 \beta) & \alpha_2 \beta - \alpha_3 & 1 \\ -\alpha_1^2 \alpha_2 \alpha_3 - \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 & \alpha_2 \alpha_3 (\alpha_1 - \alpha_2 \beta) - \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 & \alpha_3 (\alpha_2 \beta - \alpha_3) - \alpha_3 \alpha_4 & \alpha_3 - \alpha_4 \end{bmatrix}.$$

Коэффициенты, гарантирующие асимптотическую устойчивость нулевого положения равновесия системы (13), выбираются следующим образом.

Шаг 1. Выбираем произвольное положительное число α_1 .

Шаг 2. Выбираем параметр α_2 из соображений устойчивости по входу подсистемы (y_1, y_2) . При нулевом входе y_3 подсистема имеет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 1 \\ -\alpha_1^2 & \alpha_1 - \alpha_2 \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Лемма 1. Существует положительное число α_2^* такое, что для всех $\alpha_2 > \alpha_2^*$ система (14) является асимптотически устойчивой.

Доказательство леммы 1 может быть получено с помощью функции Ляпунова вида $V_2 = y_1^2 + y_2^2$. Проинтегрировав V_2 , получим

$$\dot{V}_2 = -\alpha_1 V_2 + \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 1 - \alpha_1^2 \\ 1 - \alpha_1^2 & 3\alpha_1 - 2\alpha_2 \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}.$$

Выберем параметр α_2 из условия отрицательной определенности матрицы

$$\begin{bmatrix} -\alpha_1 & 1-\alpha_1^2 \\ 1-\alpha_1^2 & 3\alpha_1-2\alpha_2\beta \end{bmatrix}:$$

$$\alpha_2 > \frac{3\alpha_1^2 + (\alpha_1^2 - 1)^2}{2\alpha_1\beta} \geq \frac{3\alpha_1^2 + (\alpha_1^2 - 1)^2}{2\alpha_1\beta_{\max}} =: \alpha_2^*.$$

Шаг 3. Выбираем параметр $\alpha_3 > \alpha_3^*$ из соображений устойчивости по входу подсистемы (y_1, y_2, y_3) с нулевым входом y_4 , повторно вводя аргументы леммы 2 в функцию Ляпунова $V_3 = y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 = V_2 + y_3^2$.

Шаг 4. Аналогично шагам 3 и 4 выбираем параметр $\alpha_4 > \alpha_4^*$.

Таким образом, утверждение 2 доказано. ■

На основе утверждения 2 могут быть выбраны коэффициенты K_3, K_4, K_5, K_6 , обеспечивающие устойчивость системы вида (11) и, как следствие, асимптотическую устойчивость (10).

Замечание. Обратим внимание, что выбор коэффициентов обратной связи затруднен необходимостью учета неравенств, связанных с нестационарным коэффициентом $\beta(t)$. Более того, синтез робастного алгоритма управления по выходу требует построения наблюдателя состояния, настройка которого для обеспечения устойчивости замкнутой системы потребует еще больших усилий.

Динамический алгоритм управления по состоянию в задаче стабилизации координат робота пространстве

Шаг 1. Введем новые переменные

$$\zeta_1 = \begin{bmatrix} \tilde{\zeta}_1 \\ \tilde{\zeta}_3 \end{bmatrix}, \zeta_2 = \begin{bmatrix} \tilde{\zeta}_2 \\ \tilde{\zeta}_4 \end{bmatrix},$$

тогда полная модель движения квадрокоптера (5)—(7) принимает вид

$$\dot{\zeta}_1 = \zeta_2,$$

$$\dot{\zeta}_2 = \begin{bmatrix} q_1(\psi, \theta) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1(\psi, \theta) & 0 \\ 0 & \beta I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \xi_5 \end{bmatrix},$$

$$\dot{\xi}_5 = \tilde{\xi}_6,$$

$$\dot{\xi}_6 = q_2(\phi, \psi, \theta, \dot{\phi}, \dot{\psi}, \dot{\theta}) + b_{21}(\phi, \psi, \theta)u_2 + b_{22}(\phi, \psi, \theta) \begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Шаг 2. Пусть вектор управляющих воздействий $\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$ будет выходом двух интеграторов

с некоторым входом $v_{12} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$, который будет выбран далее:

$$\dot{u}_1 = v_1, \quad \dot{u}_2 = v_2.$$

Шаг 3. Модель движения квадрокоптера может быть представлена в нормальной форме.

Утверждение 3. Агрегированная модель движения квадрокоптера может быть представлена в нормальной форме:

$$\begin{aligned}\dot{\zeta}_1 &= \zeta_2, \\ \dot{\zeta}_2 &= \zeta_3, \\ \dot{\zeta}_3 &= \zeta_4, \\ \dot{\zeta}_4 &= q_4(\zeta, \phi) + b_4(\zeta, \phi)U,\end{aligned}$$

где $\zeta = \text{col}(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4) \in R^{16}$ — вектор переменных состояния, $U = \text{col}(v_1, v_2, u_3, u_4)$ — вектор управляющих воздействий, а функции $q_4(\zeta, \phi)$ и $b_4(\zeta, \phi)$ обладают следующими свойствами:

$$q_4(0, \phi) = 0,$$

матрица $b_4(\zeta, \phi)$ является невырожденной для всех значений аргументов, а также

$$b_4(0, \phi) = g \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \beta \begin{bmatrix} -\cos \phi & -\sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}.$$

Доказательство утверждения 3 может быть получено путем последовательного вычисления производных переменной $\zeta_3 = \dot{\zeta}_2$ и $\zeta_4 = \dot{\zeta}_3$.

Итоговый закон управления будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{J_\phi}{C} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{J_\psi}{\ell} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{J_\theta}{\ell} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 + g \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} &= b_4(\zeta, \phi)^{-1} [-q_4(\zeta, \phi) - \gamma_1 \zeta_1 - \gamma_2 \zeta_2 - \gamma_3 \zeta_3 - \gamma_4 \zeta_4], \end{aligned}$$

где выбор параметров $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4 > 0$ существенно упрощается, поскольку определяется заданными показателями качества замкнутой системы, модель которой имеет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{\zeta}_1 \\ \dot{\zeta}_2 \\ \dot{\zeta}_3 \\ \dot{\zeta}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_4 \\ -\gamma_1 I_4 & -\gamma_2 I_4 & -\gamma_3 I_4 & -\gamma_4 I_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \end{bmatrix}, \tag{16}$$

откуда нетрудно показать, что параметры $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ могут быть выбраны как соответствующие коэффициенты типовых характеристических полиномов Баттерворта или Ньютона, или же вычислены методом модального управления.

Заключение. В настоящей работе решена задача динамического позиционирования квадрокоптера в точке с помощью двух алгоритмов. Первый основан на полной модели движения квадрокоптера, учитывающей динамику по всем линейным и угловым координатам, что позволяет обобщить результат [1] на случай изменяющегося угла рыскания. Второй — динамический алгоритм управления — характеризуется упрощенной методикой настройки регулятора. Упрощение связано с тем, что при синтезе робастного алгоритма управления, аналогичного [1, 2], структура наблюдателя состояния не содержит нестационарных коэффициентов усиления, что значительно облегчает выбор его параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borisov O. I., Pyrkin A. A., Isidori A. Application of enhanced extended observer in station-keeping of a quadrotor with unmeasurable pitch and roll angles // *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52, N 16. P. 837–842. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.067.
2. Борисов О. И., Каканов М. А., Живицкий А. Ю., Пыркин А. А. Робастное траекторное управление квадрокоптером по выходу на основе геометрического подхода // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2021. Т. 64, № 12. С. 982–992.
3. Gauthier J. P., Kupka I. *Deterministic observation theory and applications*. Cambridge University Press, 2001.
4. Isidori A., Pyrkin A., Borisov O. An extension of a lemma of Dayawansa and its application in the design of extended observers for nonlinear systems // *Automatica*. 2019. Vol. 106. P. 178–183. DOI: 10.1016/j.automatica.2019.04.043.
5. Borisov O., Isidori A., Kakanov M., Pyrkin A. Robust tracking control of a robot arm actuated by permanent magnet synchronous motors // *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 2022. Vol. 32, N 18. P. 10358–10373. DOI: 10.1002/rnc.6366.

Сведения об авторах

- Станислав Александрович Ким** — Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; инженер; E-mail: skim@itmo.ru
- Антон Александрович Пыркин** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; профессор; E-mail: pyrkin@itmo.ru
- Олег Игоревич Борисов** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: borisov@itmo.ru

Поступила в редакцию 02.06.23; одобрена после рецензирования 16.06.23; принята к публикации 28.08.23.

REFERENCES

1. Borisov O.I., Pyrkin A.A., Isidori A. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, no. 16(52), pp. 837–842, DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.067
2. Borisov O.I., Kakanov M.A., Zhivitckii A.Yu., Pyrkin A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 12(64), pp. 982–992. (in Russ.)
3. Gauthier J.P., Kupka I. *Deterministic observation theory and applications*, Cambridge University Press, 2001.
4. Isidori A., Pyrkin A., Borisov O. *Automatica*, 2019, vol. 106, pp. 178–183, DOI: 10.1016/j.automatica.2019.04.043.
5. Borisov O., Isidori A., Kakanov M., Pyrkin A. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2022, no. 18(32), pp. 10358–10373, DOI: 10.1002/rnc.6366.

Data on authors

- Stanislav A. Kim** — ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Engineer; E-mail: skim@itmo.ru
- Anton A. Pyrkin** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Professor; E-mail: pyrkin@itmo.ru
- Oleg I. Borisov** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: borisov@itmo.ru

Received 02.06.23; approved after reviewing 16.06.23; accepted for publication 28.08.23.

ИЗМЕРЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЛОКНА ТИПА PANDA
С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА САНЬЯКА

К. А. Овчинников^{1,2*}, В. В. Криштоп^{1,2,3}, Д. Г. Гилев^{1,2},
В. А. МАКСИМЕНКО², А. В. ПЕРМИНОВ²

¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания
Пермь, Россия

*ovchinnikovka@pnppk.ru

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Пермь, Россия

³Пермский государственный национальный исследовательский университет
Пермь, Россия

Аннотация. Представлена методика измерения величины двулучепреломления оптических волокон с применением интерферометра Саньяка и источника излучения с перестраиваемой длиной волны. Рассмотрены физические принципы, лежащие в основе представленной методики. Для устранения влияния нелинейности скорости перестройки длины волны источника излучения на точность измерений применен вспомогательный интерферометр с известными параметрами. Полученные значения двулучепреломления волокна совпадают с паспортными, что подтверждает эффективность предложенной методики измерения.

Ключевые слова: двулучепреломление, волокна с сохранением поляризации, волокно Panda, интерферометр Саньяка, перестраиваемый лазер

Благодарности: исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005).

Ссылка для цитирования: Овчинников К. А., Криштоп В. В., Гилев Д. Г., Максименко В. А., Перминов А. В. Измерение величины двулучепреломления волокна типа Panda с помощью интерферометра Саньяка // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 10. С. 845—851. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-845-851.

MEASURING THE BIREFRINGENCE VALUE OF A PANDA
FIBER USING A SAGNAC INTERFEROMETER

K. A. Ovchinnikov^{1,2*}, V. V. Krishtop^{1,2,3}, D. G. Gilev^{1,2},
V. A. Maksimenko², A. V. Perminov²

¹Perm Research and Production Instrument-Making Company, Perm, Russia
*ovchinnikovka@pnppk.ru

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

³Perm State University, Perm, Russia

Abstract. A technique for measuring the birefringence of optical fibers using a Sagnac interferometer and a radiation source with a tunable wavelength is presented. Physical principles that form the basis the presented methodology are considered. To eliminate the influence of the nonlinearity of the radiation source wavelength tuning rate on the measurement accuracy, an auxiliary interferometer with known parameters is used. The obtained values of measured fiber birefringence coincide with the passport values, which confirms the proposed measurement technique effectiveness.

Keywords: birefringence, polarization maintaining fibers, PANDA fiber, Sagnac interferometer, tunable laser

Acknowledgment: research was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSNM-2023-0005).

For citation: Ovchinnikov K. A., Krishtop V. V., Gilev D. G., Maksimenko V. A., Perminov A. V. Measuring the birefringence value of a PANDA fiber using a Sagnac interferometer. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 10. P. 845—851 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-845-851.

Введение. С развитием волоконно-оптических датчиков большую популярность получили PMF (polarization maintaining fiber) — оптические волокна, сохраняющие поляризацию, поскольку они способны передавать линейно-поляризованное излучение по всей длине волновода. Способность сохранять поляризацию в таких волокнах достигается за счет создания асимметричной структуры, которая приводит к возникновению двулучепреломления [1—3].

Двулучепреломление характеризует способность удерживать состояние поляризации при распространении излучения. Величина двулучепреломления определяет важные параметры PMF, такие как длина биений и дисперсия моды поляризованной волны. В ряде случаев при проектировании волоконно-оптических датчиков важно учитывать эти параметры и определять их значения [4—10].

В PMF различие показателей преломления из-за асимметричной структуры приводит к различию скоростей распространения света между двумя собственными поляризационными модами. Из-за различия скоростей распространения поляризационные моды имеют разные постоянные распространения, соответствующие „быстрой“ (fast) и „медленной“ (slow) поляризационным модам [11—13]. При этом величина двулучепреломления определяется как разница постоянных распространения между поляризационными модами:

$$\Delta\beta = \beta_s - \beta_f, \quad (1)$$

где $\beta_{s,f} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{s,f}$ — постоянные распространения для „медленной“ и „быстрой“ поляризационных мод, λ — длина волны излучения, $n_{s,f}$ — показатели преломления волокна вдоль „медленной“ и „быстрой“ осей. Это выражение можно также записать в виде:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n, \quad (2)$$

где $\Delta n = n_s - n_f$ — разность показателей преломления волокна вдоль „медленной“ и „быстрой“ осей.

Одним из основных параметров PMF является длина биений Λ , определяющая пространственный период, через который две ортогональные поляризационные моды, распространяясь по собственным осям, приходят в фазе [14, 15]:

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{\lambda}{\Delta n}. \quad (3)$$

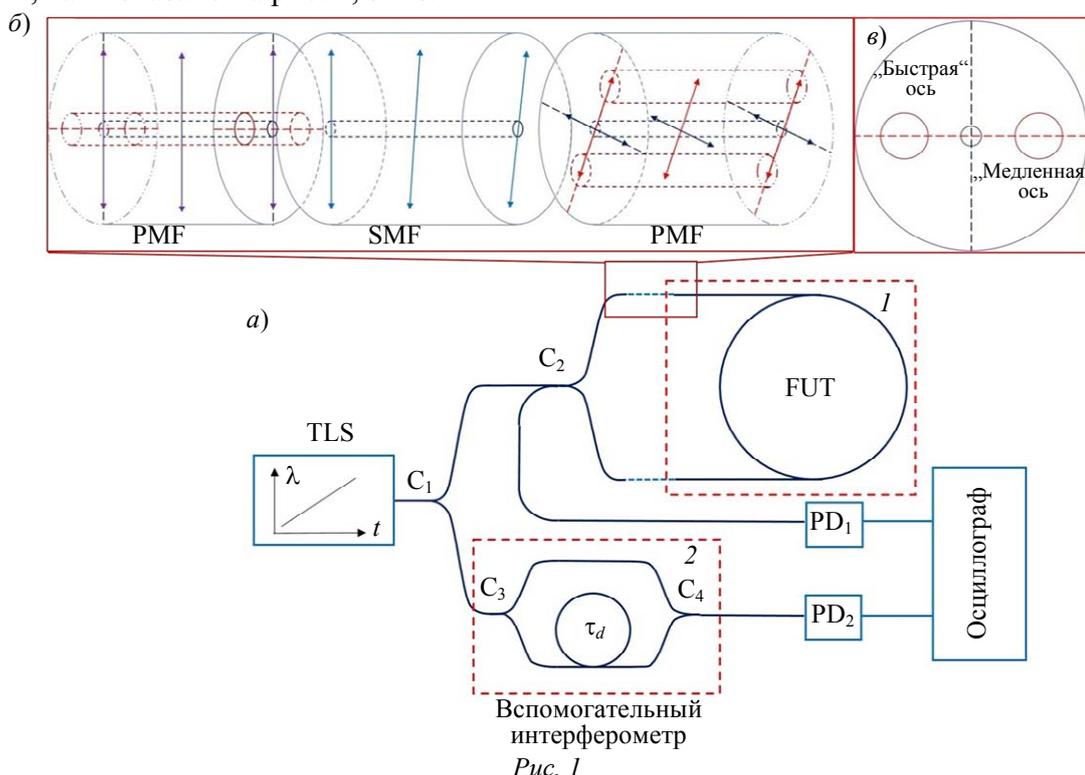
Таким образом, параметры $\Delta\beta$ и Λ характеризуют разность фазовых задержек двух поляризационных мод. Временная разность групповых задержек поляризационных мод для длины участка L :

$$\tau_p = \frac{\Delta n}{c} L \quad (4)$$

называется поляризационной модовой дисперсией (PMD).

В настоящей работе представлена методика определения величины двулучепреломления с применением интерферометра Саньяка [16] и перестраиваемого по длине волны источника излучения.

Описание методики. На рис. 1, а представлена схема эксперимента по определению двулучепреломления оптических волокон с применением интерферометра Саньяка. В данном случае линейно-поляризованное излучение от перестраиваемого лазерного источника (TLS) поступает на волоконный делитель 1×2 (C_1), где разделяется по двум направлениям. Часть излучения поступает на вспомогательный интерферометр 2, представляющий собой несимметричный интерферометр Маха—Цандера, образованный двумя волоконными делителями C_3 и C_4 , с известной временной задержкой τ_d между плечами интерферометра. Другая часть излучения поступает в интерферометр Саньяка, образованный волоконным делителем C_2 и волоконным контуром 1 (FUT, Fiber Under Test — исследуемое волокно). Все оптические элементы схемы изготовлены из PMF типа PANDA. Для соединения волоконного контура с C_2 использовано изотропное одномодовое волокно для нарушения соосности PMF волокон исследуемого контура и C_2 , с целью „разбиения“ линейной поляризации по двум ортогональным осям, как показано на рис. 1, б и в.



Частота оптического излучения от перестраиваемого лазерного источника изменяется согласно линейному закону [17]:

$$\omega = \gamma t + \omega_0, \quad (5)$$

где γ — скорость перестройки циклической частоты, ω_0 — начальная частота оптического излучения. Данное излучение после прохождения C_2 разделяется по двум направлениям обхода волоконного контура: по часовой стрелке (CW) и против (CCW). В местах соединения C_2 с волоконным контуром линейно-поляризованное излучение „разбивается“ на две собственные ортогональные поляризационные моды. Вследствие наличия двулучепреломления эти моды как будто распространяются по двум различным оптическим контурам для каждого из направлений. При повторном прохождении областей соединения волоконного контура и C_2 поляризационные моды для каждого направления „смешиваются“ между собой, при этом происходит интерференция полей для обоих направлений CW и CCW. Результат интерференции регистрируется фотоприемником PD_1 , сигнал с которого записывается при помощи осциллографа.

Интенсивность излучения, приходящего на фотоприемник, можно описать как:

$$I \approx 1 + \cos(\Delta\varphi(t)), \quad (6)$$

где $\Delta\varphi(t) = \varphi_s(t) - \varphi_f(t)$ — разность фаз между поляризационными модами. Поскольку частота излучения изменяется во времени согласно (5), то разность фаз не является постоянной величиной и зависит от времени. Рассмотрим данное обстоятельство подробнее. Фаза сигнала определяется как интеграл от частоты, поэтому, учитывая (5):

$$\varphi(t) = \int \omega(t) dt = \int (\gamma t + \omega_0) dt = \frac{1}{2} \gamma t^2 + \omega_0 t + \varphi_0. \quad (7)$$

Поляризационная мода, распространяющаяся по „быстрой“ оси, опережает моду, распространяющуюся по „медленной“ оси, на величину поляризационной модовой дисперсии τ_p , так что $\varphi_f(t) = \varphi_s(t - \tau_p)$. Учитывая это, а также (7), уравнение (6) можно записать как:

$$I \approx 1 + \cos(\gamma \tau_p t - \gamma \tau_p^2 - \omega_0 \tau_p). \quad (8)$$

Применяя к (8) преобразование Фурье, можно вычленивать частоту периодического сигнала f , которая в данном случае определяется как $f = \gamma \tau_p / 2\pi$. Вычислив данную частоту и учитывая (4), можно найти разность показателей преломления:

$$\Delta n = \frac{2\pi f c}{\gamma L} = \frac{f \lambda^2}{v L}, \quad (9)$$

где $v = d\lambda/dt$ — скорость перестройки длины волны лазера. Определив разность показателей преломления по (9) и учитывая (2)—(4), можно найти основные параметры РМФ.

Сигнал вспомогательного интерферометра формируется аналогично рассмотренному выше сигналу, только время задержки τ_d определяется разницей оптических путей между плечами интерферометра. Если известна величина τ_d , можно, проанализировав сигнал вспомогательного интерферометра, определить реальную скорость перестройки; далее по алгоритму, представленному в [18—20], можно скомпенсировать нелинейность перестройки лазера для повышения точности определения измеряемых величин.

Результаты эксперимента. Для проведения эксперимента согласно рис. 1 была собрана схема. В работе использовался TLS 81606A производства Keysight с параметрами перестройки $\lambda = 1550$ нм — центральная длина волны, $\Delta\lambda = 4$ нм — диапазон перестройки лазера, $v = 100$ нм/с — скорость перестройки, фотоприемники FPD 610-FC NIR производства MenloSystems, осциллограф Tektronix DPO 7254. В эксперименте использовался волоконный контур длиной $L = 500$ м из РМФ производства ПАО „ПНППК“.

На рис. 2 представлен пример нормированного выходного сигнала интерферометра Саньяка.

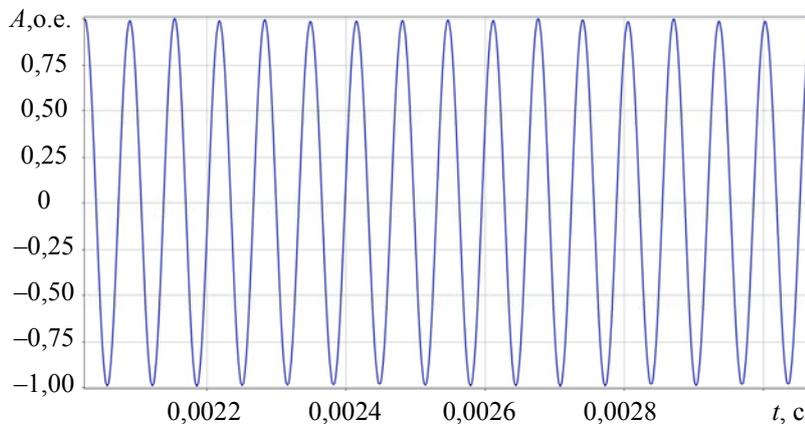


Рис. 2

В ходе эксперимента снят ряд интерференционных сигналов. Для их обработки написана программа на языке Python. Результат обработки в виде частотного спектра представлен на рис. 3.

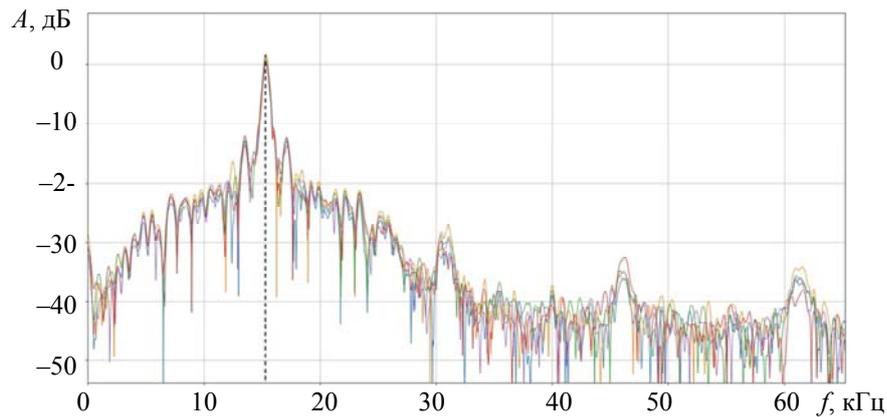


Рис. 3

В данном эксперименте спектры на рис. 3 имеют пик на частоте $f = 15,342$ кГц. Полученное значение частоты позволяет рассчитать основные параметры РМФ согласно (2)—(4), (9). Значения полученных параметров приведены ниже:

- разность показателей преломления $\Delta n = 7,4 \cdot 10^{-4}$;
- двулучепреломление $\Delta\beta = 3 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$;
- длина биений $\Lambda = 2$ мм;
- поляризационная модовая дисперсия $\tau_p = 1,23$ нс;
- удельная поляризационная модовая дисперсия $\tau_p/L = 2,46$ нс/км.

Измеренная разница показателей преломления $\Delta n = 7,4 \cdot 10^{-4}$ попадает в диапазон паспортных значений $\Delta n = (7,1—7,7) \cdot 10^{-4}$, что подтверждает работоспособность представленной методики.

Заключение. Представлена методика определения величины двулучепреломления с применением перестраиваемого лазерного источника и интерферометра Саньяка. По результатам эксперимента данная методика показала высокую точность определения параметров волокна типа Panda, в том числе за счет использования вспомогательного интерферометра. Измеренная с применением предложенной методики разность показателей преломления вдоль „быстрой“ и „медленной“ осей составила $7,4 \cdot 10^{-4}$, что попадает в диапазон паспортных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fujii Y. and Sanos K. Polarization transmission characteristics of optical fibers with elliptical cross section // Electron. Comm. Jpn. 1980. Vol. 63. Pt. I. P. 87—93. <https://doi.org/10.1002/ecja.4400630812>.
2. Kumar A., Varshney R. K., Thyagarajan K. Birefringence calculations in elliptical-core optical fibres // Electronics Letters. 1984. Vol. 20. P. 112.
3. Noda J., Okamoto K. and Sasaki Y. Polarization-maintaining fibers and their applications // Journal of Lightwave Technology. 1986. Vol. 4, N 8. P. 1071—1089. DOI: 10.1109/JLT.1986.1074847.
4. Medeiros A., Barcelos S., Rigon E., Rando R., Seminario J., Santos M., and Oliveira R. PMD Characterization of Installed Fiber Networks – Compromise Between Result Accuracy and Measurement Time // Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, Technical Digest (CD). Optica Publishing Group, 2006. Art. no. NTuC4.
5. Ten S., Edwards M. An Introduction to the Fundamentals of PMD in Fibers // White Paper. 2006. Vol. WP5051.
6. Gilev D. G., Valiushina P. M., Maksimenko V. A., and Krishtop V. V. Determination of induced birefringence in fiber-optic resonator from frequency difference between main and additional resonance peaks // Opt. Continuum. 2022. Vol. 1, N 3. P. 487—493.
7. Drozdov I. R., Ovchinnikov K. A., Boychuk E. S., & Krishtop V. V. Two-stage method for comparing the lengths of optical fibers using OFDR // Intern. Conf. Laser Optics (ICLO). June 2022.

8. Гилев Д. Г. Оценка динамического диапазона датчика угловой скорости на основе волоконно-оптического резонатора // Прикладная фотоника. 2023. Т. 10, № 1. С. 116—130.
9. Денисов И. В., Лисовский Н. В. Систематизация чувствительных к изгибу волоконных световодов // Прикладная фотоника. 2023. Т. 10, № 1. С. 131—148.
10. Краузин П. В., Трефилов И. А., Сагирова А. Р., Оглезнев А. А., Кондрашов А. Н., Юрина А. Д., Мельников Р. М. Алгоритм калибровки распределенного датчика температуры // Прикладная фотоника. 2023. Т. 10, № 2. С. 68—87.
11. Kumar A., Ghatak A. Polarization of light with applications in optical fibers. SPIE, 2011. 246 p. ISBN: 9780819482150. <https://doi.org/10.1117/3.861761>.
12. Rogers A. Polarization in Optical Fibers. Artech house, 2008. 250 p. ISBN: 9781580535342.
13. Lefevre H. Fiber-optic gyroscopes. Artech house, 2022. 416 p.
14. Бурдин В. А. Измерения длины биений оптических волокон при зондировании импульсами увеличенной длительности // Т-Сотм-Телекоммуникации и Транспорт. 2009. № S1. С. 175—177.
15. Моршнев С. К. и др. Измерение длины биений в двулучепреломляющих волоконных световодах // Фотоника. 2018. Т. 12, №. 6. С. 616—633.
16. Малыкин Г. Б. Эффект Саньяка. Корректные и некорректные объяснения // Успехи физических наук. 2000. Т. 170, №. 12. С. 1325—1349.
17. Song J. Optical frequency domain reflectometry: Sensing range extension and enhanced temperature sensitivity: M.Sc. Thesis. University of Ottawa, 2014. 113 p.
18. Song Jia, Li Wenhai, Lu Ping, Xu Yanping, Chen Liang & Bao Xiaoyi. Long-Range High Spatial Resolution Distributed Temperature and Strain Sensing Based on Optical Frequency-Domain Reflectometry // Photonics Journal. 2014. Vol. 6. P. 1—8. doi 10.1109/JPHOT.2014.2320742.
19. Gilev D. G., Ovchinnikov K. A., Krishtop V. V. et al. Fiber Optic Resonators for Angular Rate Sensors // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. Vol. 86, Suppl. 1. P. S75—S80. <https://doi.org/10.3103/S1062873822700423>. Ovchinnikov K. A., Gilev D. G., Krishtop V. V. et al. Application of Optical Frequency Domain Reflectometry for the Study of Polarization Maintaining Fibers // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. Vol. 86, Suppl. 1. P. S156—S162. <https://doi.org/10.3103/S1062873822700599>.
20. Ovchinnikov K. A., Gilev D. G., Krishtop V. V. et al. Application of Optical Frequency Domain Reflectometry for the Study of Polarization Maintaining Fibers // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. Vol. 86, Suppl. 1. P. S156—S162. <https://doi.org/10.3103/S1062873822700599>.

Сведения об авторах

Константин Александрович Овчинников

— аспирант; Пермский национальный исследовательский политехнический университет; Пермская научно-производственная приборостроительная компания, начальник лаборатории; E-mail: ovchinnikovka@pnppk.ru

Виктор Владимирович Криштоп

— д-р физ.-мат. наук, профессор; Пермский государственный национальный исследовательский университет; Пермский национальный исследовательский политехнический университет; Пермская научно-производственная приборостроительная компания, главный научный сотрудник; E-mail: Krishtop@pnppk.ru

Даниил Георгиевич Гилев

— канд. техн. наук; Пермская научно-производственная приборостроительная компания, начальник бюро; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, научный сотрудник; E-mail: gilevdg@pnppk.ru

Виталий Александрович Максименко

— канд. физ.-мат. наук, доцент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра общей физики; доцент; E-mail: mvva30@mail.ru

Анатолий Викторович Перминов

— д-р физ.-мат. наук, доцент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра общей физики; заведующий кафедрой; E-mail: perminov1973@mail.ru

Поступила в редакцию 07.06.23; одобрена после рецензирования 19.06.23; принята к публикации 28.08.23.

REFERENCES

1. Fujii Y. and Sanos K. *Electron. Comm. Jpn.*, pt. I, 1980, vol. 63, pp. 87–93, <https://doi.org/10.1002/ecja.4400630812>.
2. Kumar A., Varshney R.K., Thyagarajan K. *Electronics Letters*, 1984, vol. 20, pp. 112.
3. Noda J., Okamoto K. and Sasaki Y. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, no. 8(4), pp. 1071–1089, DOI: 10.1109/JLT.1986.1074847.
4. Medeiros A., Barcelos S., Rigon E., Rando R., Seminario J., Santos M., and Oliveira R. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference*, Optica Publishing Group, 2006, paper NTuC4.
5. Ten S., Edwards M. *White Paper*, 2006, vol. WP5051.
6. Gilev D.G., Valiushina P.M., Maksimenko V.A., and Krishtop V.V. *Opt. Continuum*, 2022, no. 1(3), pp. 487–493.
7. Drozdov I.R., Ovchinnikov K.A., Boychuk E.S., & Krishtop V.V. *International Conference Laser Optics (ICLO)*, 2022, pp. 1-1.
8. Gilev D.G. *Applied photonics*, 2023, no. 1(10), pp. 116–130. (in Russ.)
9. Denisov I.V., Lisovsky N.V. *Applied photonics*, 2023, no. 1(10), pp. 131–148. (in Russ.)
10. Krauzin P.V., Trefilov I.A., Sagirova A.R., Ogleznev A.A., Kondrashov A.N., Yurina A.D., Melnikov R.M. *Applied photonics*, 2023, no. 2(10), pp. 68–87. (in Russ.)
11. Kumar A., Ghatak A. *Polarization of light with applications in optical fibers*, SPIE, 2011, 246 p., ISBN: 9780819482150, <https://doi.org/10.1117/3.861761>.
12. Rogers A. *Polarization in Optical Fibers*, Artech house, 2008, 250 p., ISBN: 9781580535342.
13. Lefevre H. *Fiber-optic gyroscopes*, Artech house, 2022, 416 p.
14. Burdin V.A. *T-Comm: Telecommunications and transport*, 2009, no. S1, pp. 175–177. (in Russ.)
15. Morshnev S.K., Gubin V.P., Starostin N.I., Prshiyalkovsky Ya.V., Sazonov A.I. *Photonics Russia*, 2018, no. 6(12), pp. 616–633. (in Russ.)
16. Malykin G.B. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 2000, no. 12(43), pp. 1229–1252.
17. Song J. *Optical frequency domain reflectometry: Sensing range extension and enhanced temperature sensitivity*. M.Sc. Thesis, Université d'Ottawa, 2014, 113 p.
18. Song Jia, Li Wenhai, Lu Ping, Xu Yanping, Chen Liang, & Bao Xiaoyi. *Photonics Journal*, 2014, vol. 6, pp. 1–8, DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2320742.
19. Gilev D.G., Ovchinnikov K.A., Krishtop V.V. et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2022, vol. 86, suppl. 1, pp. S75–S80, <https://doi.org/10.3103/S1062873822700423>.
20. Ovchinnikov K.A., Gilev D.G., Krishtop V.V. et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2022, vol. 86, suppl. 1, pp. S156–S162, <https://doi.org/10.3103/S1062873822700599>.

Data on authors

- Konstantin A. Ovchinnikov** — Post-Graduate Student; Perm National Research Polytechnic University; Perm Research and Production Instrument-Making Company, Head of Laboratory; E-mail: ovchinnikovka@pnppk.ru
- Victor V. Krishtop** — Dr. Sci., Professor; Perm State University; Perm National Research Polytechnic University; Perm Research and Production Instrument-Making Company, Chief Researcher; E-mail: Krishtop@pnppk.ru
- Daniil G. Gilev** — PhD; Perm Research and Production Instrument-Making Company; Perm National Research Polytechnic University, Researcher; E-mail: gilevdg@pnppk.ru
- Vitaliy A. Maksimenko** — PhD, Associate Professor; Perm National Research Polytechnic University, Department of General Physics, Associate Professor; E-mail: mva30@mail.ru
- Anatoliy V. Perminov** — Dr. Sci., Associate Professor; Perm National Research Polytechnic University, Department of General Physics, Head of the Department; E-mail: perminov1973@mail.ru

Received 07.06.23; approved after reviewing 19.06.23; accepted for publication 28.08.23.

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

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

УДК 620. 179.17
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-852-868

**МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ
ПРИ КОНТРОЛЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ
В ПРОЦЕССЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ**

Е. АЛТАЙ^{1*}, Д. О. КУЗИВАНОВ², Д. А. РОЖДЕСТВЕНСКИЙ³, М. И. САННИКОВ³, К. А. СТЕПАНОВА⁴

¹*Национальный центр государственной научно-технической экспертизы, Алматы, Казахстан
aeldos@inbox.ru

²*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

³*НЦМУ „Передовые цифровые технологии“ СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия*

⁴*Научно-технический центр „Эталон“, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Представлены результаты акустико-эмиссионного контроля дефектообразования в изделиях при прямом лазерном выращивании. Рассмотрены особенности применения метода акустической эмиссии и обработки результатов регистрации сигналов акустической эмиссии с использованием каскадной полиномиальной цифровой фильтрации. Приведены результаты экспериментальной апробации метода каскадной фильтрации для обнаружения таких дефектов внутренней структуры, как трещины и поры. Выделены фрагменты амплитудно-временных и частотно-временных диаграмм сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных при развитии дефектов в процессе выращивания изделий. Выполнена оценка зависимости сигналов акустической эмиссии от параметров дефектообразования. Установлена взаимосвязь между параметрами сигналов акустической эмиссии и мощностью излучения лазера (характеризует процесс дефектообразования), а также содержанием азота в порошке жаропрочного сплава.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, контроль дефектообразования, аддитивное производство, прямое лазерное выращивание, фильтрация, мощность лазера, металлография, хром-никелевый сплав, сигнал

Благодарности: исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению „Передовые цифровые технологии“ СПбГМТУ (соглашение от 20.04.2022 № 075-15-2022-312).

Ссылка для цитирования: Алтай Е., Кузиванов Д. О., Рождественский Д. А., Санников М. И., Степанова К. А. Методы фильтрации сигналов акустической эмиссии при контроле дефектообразования в процессе прямого лазерного выращивания изделий // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 10. С. 852—868. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-852-868.

**METHODS FOR FILTERING ACOUSTIC EMISSION
SIGNALS WHEN MONITORING DEFECT FORMATION
IN THE PROCESS OF DIRECT LASER GROWTH OF PRODUCTS**

Ye. Altay^{1*}, D. O. Kuzivanov², D. A. Rozhdestvensky³, M. I. Sannikov³, K. A. Stepanova⁴

¹*National Center of Science and Technology Evaluation, Almaty, Republic of Kazakhstan
aeldos@inbox.ru*

²*ITMO University, St. Petersburg, Russia*

© Алтай Е., Кузиванов Д. О., Рождественский Д. А., Санников М. И., Степанова К. А., 2023

³World-class Scientific Center of Advanced Digital Technologies SMTU, St. Petersburg, Russia⁴Scientific and Technical Center Etalon, St. Petersburg, Russia

Abstract. Results of acoustic emission monitoring of defect formation in products during direct laser growth are presented. The features of applying the acoustic emission method and results of processing recorded acoustic emission signals with the use of cascade polynomial digital filtering are considered. Results of experimental testing of the cascade filtration method for detecting internal structure defects such as cracks and pores are presented. Fragments of amplitude-time and frequency-time diagrams of acoustic emission signals recorded during the development of defects in the process of growing products are isolated. An assessment is made of the dependence of acoustic emission signals on defect formation parameters. A relationship between the acoustic emission signals parameters and applied laser radiation power is established, which characterizes the process of defect formation, as well as the nitrogen content in the heat-resistant alloy powder.

Keywords: acoustic emission, defect formation testing, additive manufacturing, direct laser growth, filtering, laser power, metallography, chromium-nickel alloy, signal

Acknowledgment: The research was carried out with the financial support of the Russian Ministry of Education and Science as part of the implementation of the program of the world-class Scientific Center in the direction of “Advanced Digital Technologies” of St. Petersburg State Marine Technical University (agreement dated April 20, 2022, No. 075-15-2022-312).

For citation: Altay Ye., Kuzivanov D. O., Rozhdestvensky D. A., Sannikov M. I., Stepanova K. A. Methods for filtering acoustic emission signals when monitoring defect formation in the process of direct laser growth of products. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 10. P. 852—868 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-852-868.

Введение. В связи с развитием аддитивного производства (АП) возникает потребность в применении методов контроля изделий, изготовленных с использованием аддитивных технологий (АТ), на всех этапах их жизненного цикла [1, 2]. Это обусловлено тем, что надежность и эксплуатационные характеристики зависят от наличия в изделиях, изготовленных с применением АТ, структурных неоднородностей и несплошностей [1]. Основными типами дефектов металлических изделий, изготовленных с применением АТ, являются трещины, пористость, несплавления, неметаллические включения, локальное и общее смещение слоев и избыточная шероховатость. Для металлических изделий АП трещины и пористость наиболее критичны [1], так как могут привести к разрушению изделия в условиях эксплуатационных нагрузок. Появление перечисленных типов дефектов в изделиях АП особенно характерно для прямого лазерного выращивания (ПЛВ).

ПЛВ является одним из перспективных методов АП. Его отличительная особенность — изготовление изделий и прототипов из различных материалов [3]. Суть метода ПЛВ заключается в послойном последовательном выплавлении порошкового металла с помощью лазерного излучения [3]. В качестве наплавочного материала используются различные сферические металлические порошки на основе цинка, бронзы, стали, титана, хрома, никеля и др. [3, 4]. Необходимо подчеркнуть, что на качество изделия и образование в нем дефектов влияют не только свойства порошкового материала, но и особенности процесса ПЛВ [5—8]: технологические свойства порошкового материала и технологические параметры ПЛВ, в первую очередь, энергия лазера, скорость сканирования лазерного луча и температура платформы, применяемой для ПЛВ.

Установлено, что при ПЛВ мощность энергии лазерного излучения вносит существенный вклад в избирательное сплавление металлических порошков [6, 8]. Следовательно, основными факторами, определяющими качество изделий ПЛВ, являются мощность излучения лазера, свойства порошка и скорость прохода лазера [8]. Также следует подчеркнуть, что от мощности излучения лазера на различных стадиях ПЛВ напрямую зависит состояние расплава металлических порошков и затвердевание расплавленного металла, что оказывает существенное влияние на тип и размер формируемых дефектов, характеристики которых также могут зависеть от технологических свойств металлических порошков [5, 9, 10]. Для изготовления изделий наиболее широко используются жаропрочные хром-никелевые сплавы

следующих видов: ЭП648, ЭП74 и Hastelloy X [5, 11, 12]. Согласно многочисленным исследованиям [5, 9—12], перечисленные сплавы различаются по фракционному составу, массовой доли химических элементов, морфологии частиц и прочим характеристикам. При этом выбор металлического порошка, наиболее подходящего по устойчивости к коррозии, жаропрочности, пластичности и морфологии частиц (не более 50 мкм [7, 11, 12]) для изготовления изделий АП на основе метода ПЛВ, является нетривиальной задачей. Несмотря на выявленные особенности изготовления изделий АП, необходимо подбирать жаропрочный металлический порошок под конкретную задачу, а неразрушающий контроль процесса дефектообразования в выращиваемых изделиях является актуальной и важной задачей, решение которой требует комплексного подхода.

В работах [1, 2, 8, 13, 14] для контроля процесса дефектообразования исследуемых изделий предложены методы акустического и оптического контроля. Наиболее перспективным для контроля внутренних дефектов, а именно трещинообразования и порообразования, происходящих при послойном расплавлении порошкового материала, считается метод акустической эмиссии (АЭ), чувствительный к внутренней перестройке структуры материала изделий в процессе изготовления [13, 14].

Оптический метод контроля процесса дефектообразования считается также перспективным и особенно важным для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов изготовленных изделий [1]. В связи с этим экспериментальные исследования, направленные на изучение процесса образования дефектов в изделиях АП на основе метода АЭ, актуальны и перспективны с точки зрения обеспечения неразрушающего контроля.

Сложность практического применения метода АЭ состоит в неизбежном влиянии помех [15] на информативную составляющую сигналов АЭ [16], что существенно снижает отношение акустического сигнала к влияющей помехе и затрудняет поиск ассоциации параметров АЭ с источником АЭ [17]. Для преодоления этой сложности в настоящей статье обосновано применение ранее разработанного метода полиномиальной цифровой фильтрации сигналов АЭ на основе фильтра верхних частот (ФВЧ) [16, 18], аппроксимированного полиномом Баттерворта второй степени $n = 2$. Этот метод обеспечивает устойчивую фильтрацию натуральных сигналов АЭ с требуемыми показателями качества фильтра (время переходного процесса, перерегулирование, коэффициент усиления) [16], что подтверждается размещением корневых локусов (нулей и полюсов) внутри единичного круга на правой части комплексной плоскости.

Выбор этого метода обоснован возможностью проведения высокоточной фильтрации при минимальных искажениях информативной составляющей формы сигнала АЭ [17], а также устойчивостью к искажающему действию помех [16—18] при представлении отфильтрованных сигналов в частотно-временной области.

Одним из способов представления результатов обработки АЭ-данных после их фильтрации является частотно-временной анализ сигналов [15]. Необходимость [19] применения методов частотно-временного анализа связана с возможностью визуализации высокочастотных компонентов сигналов АЭ по времени, а низкочастотных составляющих — по частоте. Для частотно-временной обработки сигналов АЭ широко применяются методы преобразования Фурье, вейвлета и Гильберта—Хуанга [20]. Перечисленные методы аналитически взаимосвязаны [21], но зависят от свойств анализируемого сигнала. Например, вейвлет-преобразование дает возможность анализировать нелинейные и нестационарные участки сигналов [21] и представлять их в виде вейвлетных скалограмм, применение которых расширяет возможности визуализации данных АЭ-контроля [15, 19]. Поэтому в настоящей работе для представления результатов обработки сигналов АЭ в частотно-временной области используются вейвлет-скалограммы.

В настоящей работе представлены результаты АЭ-контроля процесса порообразования и трещинообразования в изделиях при их ПЛВ на основе использования обработки зарегистри-

рированных зашумленных сигналов АЭ методом полиномиальной каскадной фильтрации с последующим частотно-временным анализом. Также в работе приведена статистическая оценка влияния различных режимов ПЛВ и состава порошка сплава на образование дефектов.

Цель исследований — повышение эффективности обработки и анализа сигналов АЭ при контроле дефектообразования за счет применения полиномиальной цифровой фильтрации, а также разработка модели влияния выбранных факторов на диагностический параметр АЭ.

Статистическая модель, характеризующая влияние различных режимов мощности излучения лазера и химического состава сферического порошка сплава ЭП648, разработана на основе метода регрессионного анализа. Выбор связан с работоспособностью и высокой чувствительностью этого метода к анализируемым данным контроля [22, 23], а также с отсутствием требований по специальному обучению выборок, полученных при контроле [24].

Технологические свойства порошков, используемых в АП. При производстве изделий АП, эксплуатируемых в условиях воздействия высоких температур, широко применяются жаропрочные хром-никелевые сплавы [5, 9—12, 25, 26]. По результатам анализа работ [25, 26] были выявлены основные характеристики сплавов, полученные на основе методов, представленных на рис. 1.

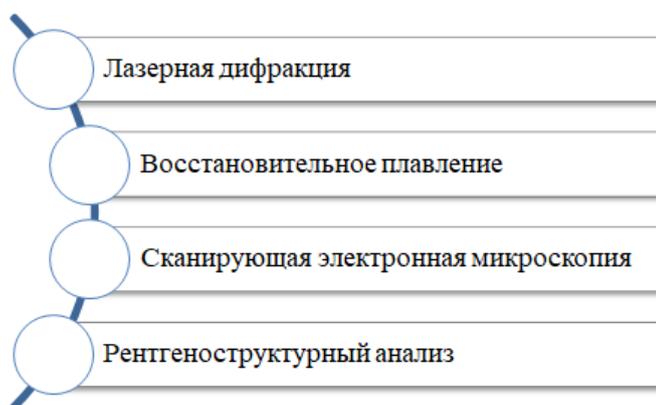


Рис. 1

В результате анализа технологических свойств различных жаропрочных сплавов [5, 11, 12, 25, 26] установлено, что образцы порошков имеют однофазный аустенитный состав с гранцентрированной кубической кристаллической решеткой из-за содержания легирующих элементов: хрома более 18 % и никеля — 8 % [26]. За счет содержания легирующих элементов и низкого содержания кислорода порошок ЭП648, в отличие от ЭП741 и Hastelloy, устойчив к коррозии, пластическим деформациям и высоким температурам [11, 12, 26], чем и обоснован выбор именно этого сплава. Размер частиц (диаметр) данного сферического порошка не превышает 50 мкм [11, 26], что способствует малому распределению частиц по гранулометрическому составу [7] и уменьшению пористости изготавливаемых изделий [8]. Однако в порошке сплава ЭП648 содержится азот в диапазоне от 0,109 до 0,111 % [12, 26], это может способствовать появлению трещин в готовом изделии [12], что также необходимо учитывать при изготовлении изделий методом ПЛВ. Влияние состава сферического порошка сплавов на изготавливаемые изделия также отмечалось в работах [7, 8, 27]. Для дальнейших этапов исследования обоснован выбор ЭП648 (вследствие объема содержащегося в нем азота) в качестве предиктора, влияющего на процесс трещинообразования. Таким образом, анализ работ [5, 9—12, 25, 26], посвященных оценке хром-никелевых сплавов, показал, что наиболее коррозионностойким, пластичным и жаропрочным является материал ЭП648, поэтому в настоящей работе на нем остановлен выбор для проведения исследований.

Регистрация и анализ зашумленных сигналов АЭ. Для проведения АЭ-контроля в качестве измерительного средства использовалась акустико-эмиссионная система СЦАД 16.10 с комплектом преобразователей акустической эмиссии ПК 0.1-0.7. ПЛВ выполнялось с помощью роботизированной установки ИЛИСТ-L [28], состоящей из производственной камеры, двухосевого вращателя, наплавочной головки, робота-манипулятора, системы подготовки и подачи порошка и наплавочного сопла [28]. При послойном выращивании изделий сигналы АЭ регистрировались непосредственно во время лазерного выращивания.

В рамках экспериментальных исследований были выращены пять образцов в форме параллелепипеда при различных режимах/значениях мощности излучения лазера: 800, 1000, 1200, 1400, 1600 Вт. Каждый образец выращивался на алюминиевой подложке, закрепленной на предметном столе в производственной камере роботизированной установки ИЛИСТ-L (рис. 2) под наплавочной головкой. АЭ-события регистрировались последовательно при выращивании каждого образца. За все время выращивания образцов зарегистрировано 20 натуральных сигналов АЭ.

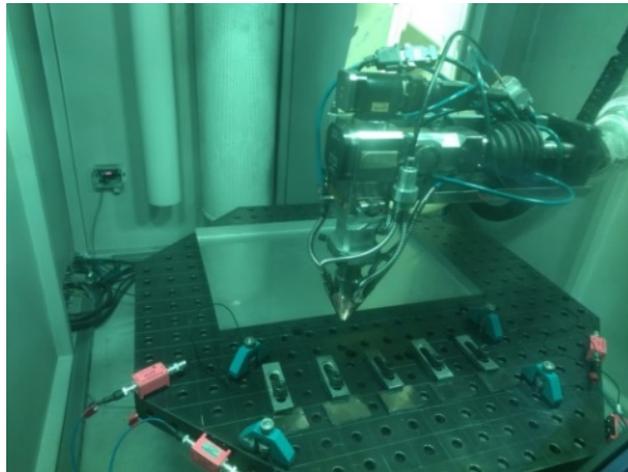


Рис. 2

Для отделения информативной составляющей от помехи предварительно был записан сигнал, возникающий от перемещения манипулятора роботизированной установки ПЛВ (эта помеха наиболее существенно искажает информативную составляющую [29]). На рис. 3 представлены амплитудно-временная диаграмма помехи при ПЛВ (*a*; *q* — отсчеты) и ее частотный спектр (*б*).

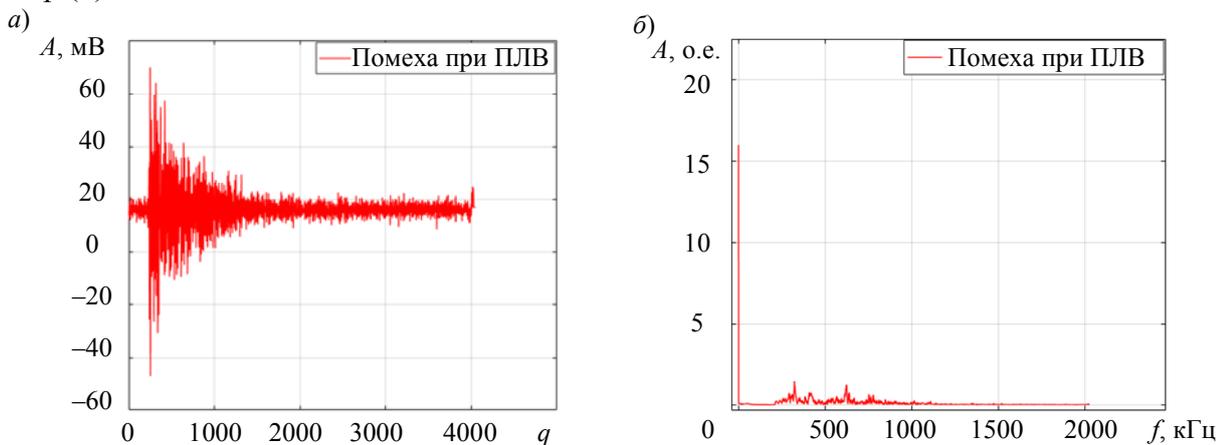


Рис. 3

На рис. 4 проиллюстрированы характеристики одного из зашумленных сигналов АЭ при ПЛВ (*a* — до фильтрации; *б* — частотный спектр). Совместный анализ частотных спектров позволил обосновать выбор частоты среза фильтра для проведения обработки и дальнейшего анализа сигналов АЭ.

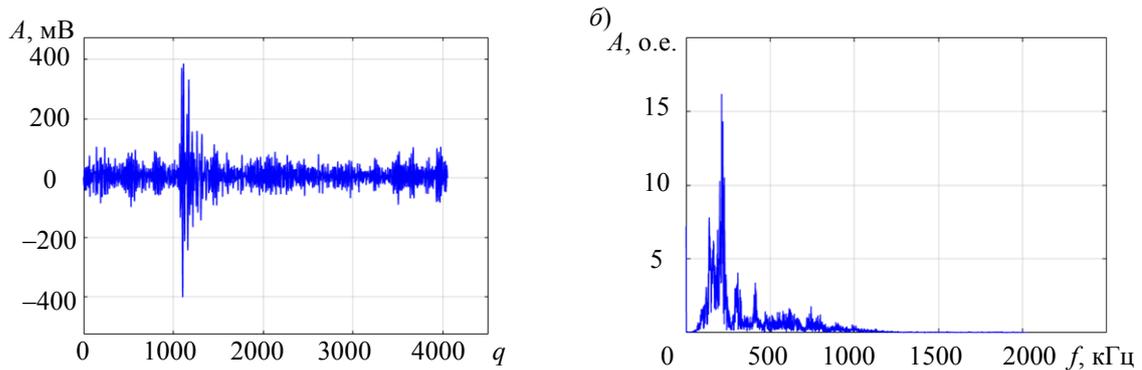


Рис. 4

Сравнительный анализ характеристик зарегистрированных сигналов, представленных на рис. 3 и 4, выявил, что частотная составляющая выше 1000 кГц относится к помехе, а составляющая от 90 до 250 кГц — к информативной. Полученные результаты экспериментальной оценки частоты информативной составляющей сигнала и помехи совпадают с результатами работы [29], в которой отмечено, что частота сигналов, характеризующих процесс трещинообразования, может находиться в диапазоне 100—250 кГц [29].

Согласно многочисленным исследованиям [27, 30, 31], частота сигналов АЭ от порообразования находится ниже уровня 100 кГц. Это позволяет обосновать выбор нижней (до 100 кГц) и верхней (до 250 кГц) границы частотного диапазона для настройки двух ФВЧ с целью выделения сигнала АЭ трещинообразования, порообразования и подавления помехи, частот, локализованных на спектре выше 250 кГц.

Обработка и анализ сигналов АЭ, зарегистрированных при дефектообразовании. Обработка сигналов АЭ проводилась в два этапа. *Этап 1* включал расчет передаточных функций ФВЧ и их анализ, разработку схемы каскадной двунаправленной фильтрации для выделения сигналов АЭ от дефектов и их визуализацию в частотно-временной области. *Этап 2* включал в себя анализ и оценку диагностического параметра АЭ, характеризующего процесс дефектообразования.

Этап 1. Рассчитанные передаточные функции непрерывных ФВЧ Баттерворта и их билинейное преобразование представлены в табл. 1.

Таблица 1

Каскад фильтров	Передаточные функции ФВЧ	
	непрерывная, $W(s)$	дискретная, $W(z)$
ФВЧ при $f_c = 100$ кГц	$\frac{s^2}{s^2 + 0,06364s + 0,002025}$	$\frac{0,9687z^2 - 1,937z + 0,9687}{z^2 - 1,936z + 0,9384}$
ФВЧ при $f_c = 250$ кГц	$\frac{s^2}{s^2 + 0,1768s + 0,01563}$	$\frac{0,9155z^2 - 1,831z + 0,9155}{z^2 - 1,824z + 0,8382}$

Примечание: s — комплексная переменная непрерывной передаточной функции фильтра; z — комплексная переменная дискретной передаточной функции фильтра

Проведенный анализ показателей качества показал, что цифровые ФВЧ, настроенные на частоту среза 100 и 250 кГц, являются устойчивыми, коэффициент их усиления на частотах среза составляет 0,7. Корни-полюса и корни-нули рассчитанных фильтров локализованы на локусах полюса $p_{1,2} = 0,968 \pm 0,0308i$ для $f_c = 100$ кГц и $p_{1,2} = 0,912 \pm 0,080i$ для $f_c = 250$ кГц, а также на локусах нуля на $z = 0,999 \approx 1$. Анализ подтверждает локализацию корней передаточной функции ФВЧ внутри единичного круга, а именно на правой части комплексной z плоскости, и фильтры считаются устойчивыми для проведения каскадной фильтрации натуральных сигналов АЭ.

Каскадная двунаправленная фильтрация реализована в программном продукте MatLab версии R2017b согласно структурной схеме, представленной на рис. 5.

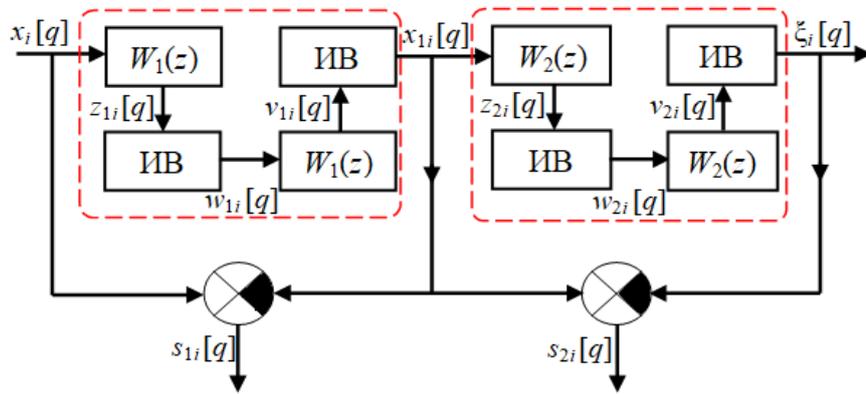


Рис. 5

Согласно разработанной структурной схеме, при двунаправленной фильтрации входная последовательность зашумленных сигналов i АЭ обрабатывается фильтрами $z_{1i}[q]$ и $z_{2i}[q]$ первой и второй последовательности в прямом направлении, затем с помощью блока инверсии времени (ИВ) изменяется порядок следования отсчетов $w_{1i}[q]$ и $w_{2i}[q]$ отфильтрованных сигналов на обратный. Полученные отсчеты сигналов i АЭ обрабатываются в обратном направлении $v_{1i}[q]$ и $v_{2i}[q]$ с помощью $W_1(z)$ и $W_2(z)$, затем окончательная инверсия времени на выходе блока ИВ приводит к изменению порядка следования отсчетов на обратный. На выходе блока ИВ вносимые искажения фильтрами взаимно компенсируются и формируются соответствующие сигналы.

Введение блока „сумматор-вычитатель“ обеспечивает формирование сигналов от дефектов конкретного типа, например, сигнал $s_{1i}[q]$ характеризует процесс порообразования, а $s_{2i}[q]$ — трещинообразования. Сигналы $\xi_i[q]$ являются только высокочастотной помехой, влияющей на характеристики параметров АЭ. Разделение сигналов АЭ на $s_{1i}[q]$ и $s_{2i}[q]$ также позволяет количественно оценить отношение данных информативных сигналов к помехе $\xi_i[q]$ аналогично [17] отношению сигнал/помеха (ОСП). Оцененные таким образом показатели характеризуют повышение качества обработки сигнала на выходе каждой последовательности каскада фильтров. Результат оценки показателя ОСП представлен на рис. 6 в виде диаграммы Тьюки, иллюстрирующей повышение результативности обработки сигнала АЭ.

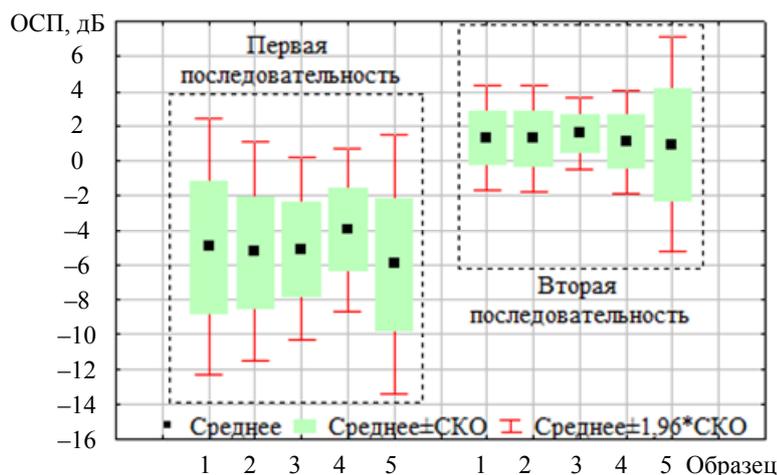


Рис. 6

Результаты каскадной фильтрации показали, что среднее значение ОСП на выходе ФВЧ повышается, что подтверждает различимость значений этого показателя и повышение результативности обработки сигнала. Вместе с тем различимость значений экспериментального показателя ОСП на выходе каждого ФВЧ подтверждается статистикой T -теста (табл. 2;

M — математическое ожидание, СКО — среднеквадратическое отклонение, p — коэффициент статистической значимости), где данные АЭ-контроля от дефектов представлены в виде групп (первая и вторая последовательность).

Таблица 2

Различие значений показателя ОСП
на выходе каждой последовательности каскада фильтров

Образец	$M \pm \text{СКО}$, дБ		p
	первая последовательность	вторая последовательность	
1	$-4,957 \pm 3,779$	$1,335 \pm 1,519$	0,034
2	$-5,267 \pm 3,222$	$1,298 \pm 1,574$	0,015
3	$-5,093 \pm 2,699$	$1,593 \pm 1,058$	0,013
4	$-3,959 \pm 2,396$	$1,119 \pm 1,518$	0,007
5	$-5,949 \pm 3,808$	$0,938 \pm 3,168$	0,001

Примечание: показатели статистически значимы при $p < 0,1$

Среднее значение ОСП для каждого образца, рассчитанное на выходе первой последовательности каскада фильтров, статистически значимо отличается от среднего значения ОСП второй последовательности. Следует отметить, что отрицательный показатель ОСП на выходе первой последовательности каскада фильтров обусловлен меньшим значением амплитуды выделенного сигнала АЭ по отношению к амплитуде помехи.

В работе [32] отмечалось, что отрицательное или низкое значение показателя, характеризующего ослабление помехи на выходе каскада фильтров для низкоамплитудных сигналов сложной формы и структуры, обусловлено тем, что амплитуда измеренных сигналов АЭ [33] ниже, чем амплитуда помехи [15]. Это также подтверждает корректность проведенной оценки данного показателя.

Различимость максимальных значений амплитуды сигналов АЭ, полученных от пор и трещин, несложно заметить из рис. 7 (a — $г$ — образец № 1; $д$ — $з$ — № 5).

Результаты анализа показали, что сигналы АЭ от пор (рис. 7, $б$ и $е$) и трещин (рис. 7, $в$ и $ж$) по форме и характеристике отличаются друг от друга, а также от зашумленного сигнала (рис. 7, $а$ и $д$). При этом максимальная амплитуда сигналов на образце № 5 намного выше, чем на № 1. Форма сигнала АЭ для всех образцов подобна форме сигнала дискретной акустической эмиссии, а форма выделенного сигнала помехи (рис. 7, $г$ и $з$) содержит смесь акустической и непрерывной помех, которые обусловлены перемещением манипулятора роботизированной установки и влиянием мощности излучения лазера на различных стадиях ПЛВ, что не противоречит результатам [29].

Результаты анализа частотно-временных характеристик сигналов, представленных на рис. 8 ($а$ — $г$ — образец № 1; $д$ — $з$ — № 5), показали, что на выходе цифровых фильтров идентифицируются сигналы АЭ от порообразования (рис. 8, $б$ и $е$) и трещинообразования (рис. 8, $в$ и $ж$), где их информативная составляющая (рис. 8, $а$ и $д$) „замаскирована“ помеховой.

Вейвлет-скалограмма информативных сигналов АЭ от пор и трещин (рис. 8, $б$ и $е$, а также $в$ и $ж$) отличается от вейвлет-скалограммы исходного сигнала, так как после фильтрации повышается результативность обработки. Стоит отметить, что частотно-временные домены на диаграммах сигналов помех (рис. 8, $а$ и $г$, а также $д$ и $з$) совпадают. Это подтверждает корректность всех процедур фильтрации, реализованных внутри разработанной схемы каскадной двунаправленной фильтрации.

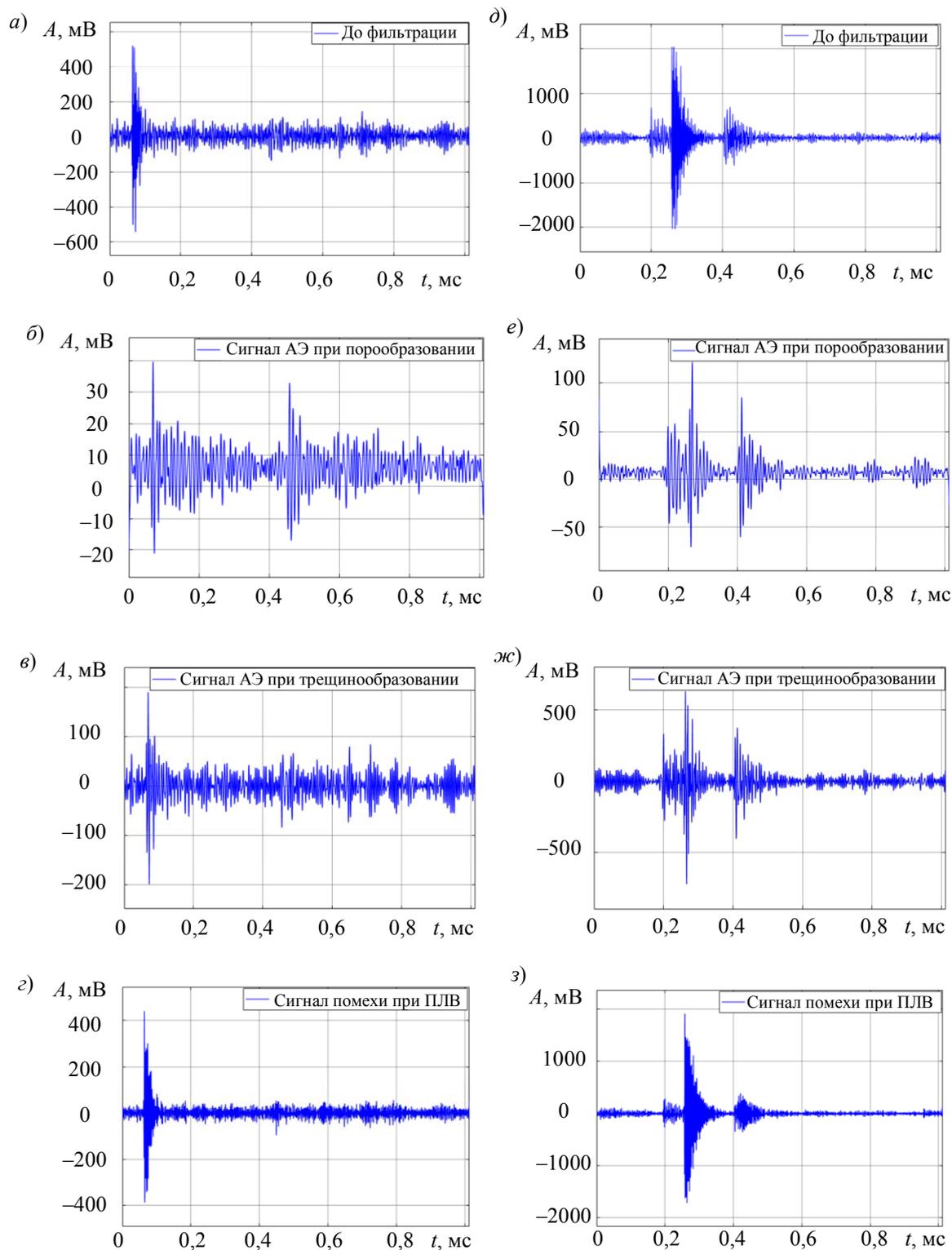


Рис. 7

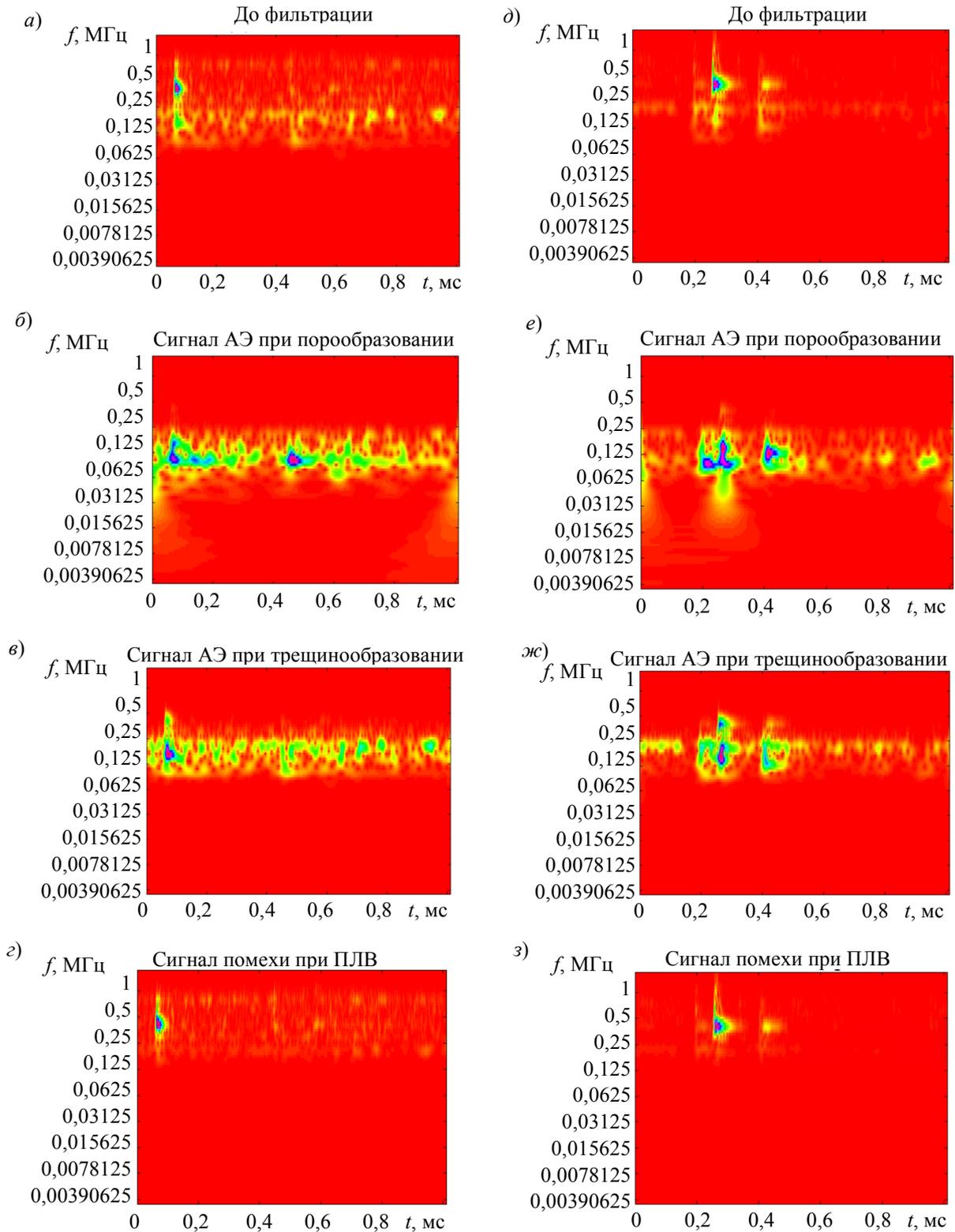


Рис. 8

Этап 2. На этом этапе выявлено, что с увеличением мощности лазера ПЛВ в испытуемых образцах увеличивается число пор и трещин, которые оказывают значительное влияние на параметры АЭ. Это влияние несложно заметить на рис. 9 и 10 (*а* — до обработки; *б* — АЭ от порообразования; *в* — АЭ от дефектообразования), где максимальная амплитуда АЭ для образца № 5 (рис. 10) значительно выше, чем для образца № 1 (рис. 9), что также показывает различимость амплитуды АЭ при сравнении с результатами до фильтрации (табл. 3).

Образец	Характеристики амплитуды АЭ по каналам			
	M±СКО, мВ			
	до обработки	порообразование	трещинообразование	помехи
1	2402,000±1217,335 $p = 0,029^*$	632,068±467,251 $p = 0,073^*$	418,181±292,325 $p = 0,064^*$	155,288±695,665 $p = 0,020^*$
	$p = 0,019^{**}$		$p = 0,024^{**}$	$p = 0,048^{**}$
2	1712,500±706,873 $p = 0,016^*$	467,817±132,935 $p = 0,005^*$	422,652±93,120 $p = 0,002^*$	993,767±453,865 $p = 0,022^*$
	$p = 0,024^{**}$		$p = 0,026^{**}$	$p = 0,011^{**}$
3	2000,750±794,011 $p = 0,015^*$	492,749±216,329 $p = 0,019^*$	428,969±504,904 $p = 0,013^*$	106,367±440,299 $p = 0,016^*$
	$p = 0,013^{**}$		$p = 0,015^{**}$	$p = 0,013^{**}$
4	2205,750±995,030 $p = 0,021^*$	600,711±101,621 $p = 0,001^*$	504,904±116,576 $p = 0,003^*$	131,271±586,070 $p = 0,020^*$
	$p = 0,045^{**}$		$p = 0,046^{**}$	$p = 0,022^{**}$
5	2433,500±1492,962 $p = 0,047^*$	872,869±914,056 $p = 0,012^*$	646,229±688,105 $p = 0,015^*$	164,222±107,397 $p = 0,055^*$
	$p = 0,032^{**}$		$p = 0,036^{**}$	$p = 0,032^{**}$

Пр и м е ч а н и е : * — различие средних значений амплитуды между каналами,
** — различие амплитуды до и после реализации метода фильтрации

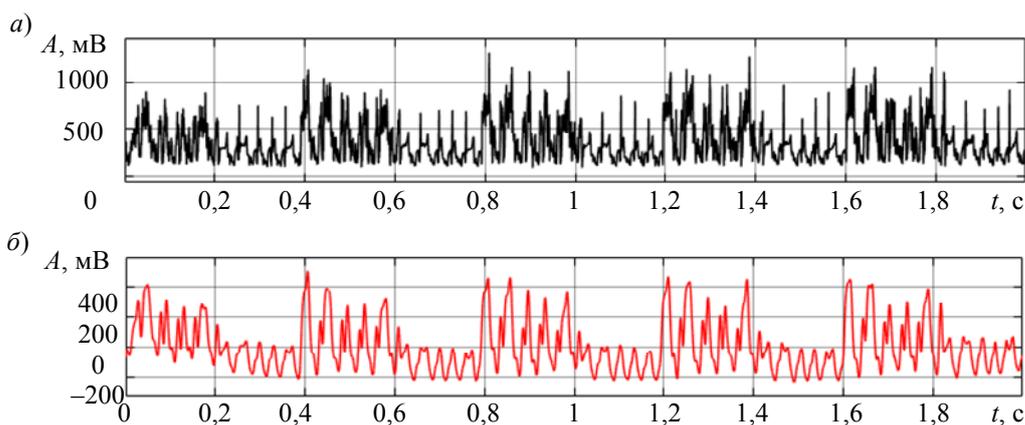


Рис. 9

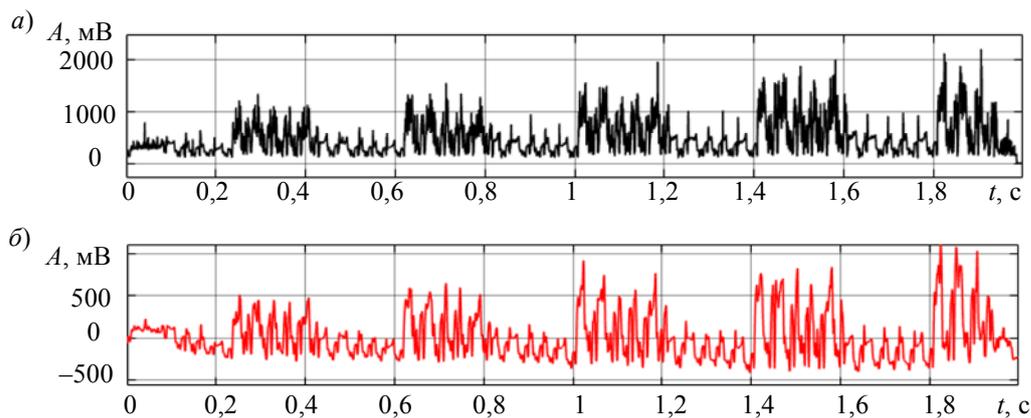


Рис. 10

Из табл. 3 видно, что среднее значение измеренных сигналов АЭ каждого канала при контроле каждого образца статистически значимо отличается от среднего значения сигналов в другой группе. Различие средних значений зашумленных и отфильтрованных сигналов обусловлено высокой результативностью метода цифровой фильтрации. Из табл. 3 также следует, что значение амплитуды АЭ от образца к образцу увеличивается, это обусловлено перестройкой внутренней структуры материала, следовательно, сигнал дискретной АЭ характеризует

процесс кристаллизации сплава ЭП648 под воздействием мощности излучения лазера на различных стадиях ПЛВ.

Известно [34], что наличие дефектов в кристаллической решетке (КР) или разрушение внутренних структурных связей изделий вызывает необратимые смещения соседних связей КР. При этом прочность и устойчивость структурных связей в КР в большей степени также зависит от характера дефектов [35]. Вместе с тем наличие дефектов в КР изделий может являться не единственной причиной, влияющей на характеристики сигналов АЭ. Также на амплитуду дискретной АЭ может существенно влиять содержание примесей азота в сферическом порошке ЭП648, тесная взаимосвязь этих параметров позволяет установить причину возникновения дефектов в выплавляемых изделиях.

Оценка влияния факторов ПЛВ на процесс дефектообразования. Существенное влияние на качество изготавливаемых изделий оказывают мощность излучения лазера (рис. 11, б) и процентное содержание азота N в порошке ЭП648 (рис. 11, а).

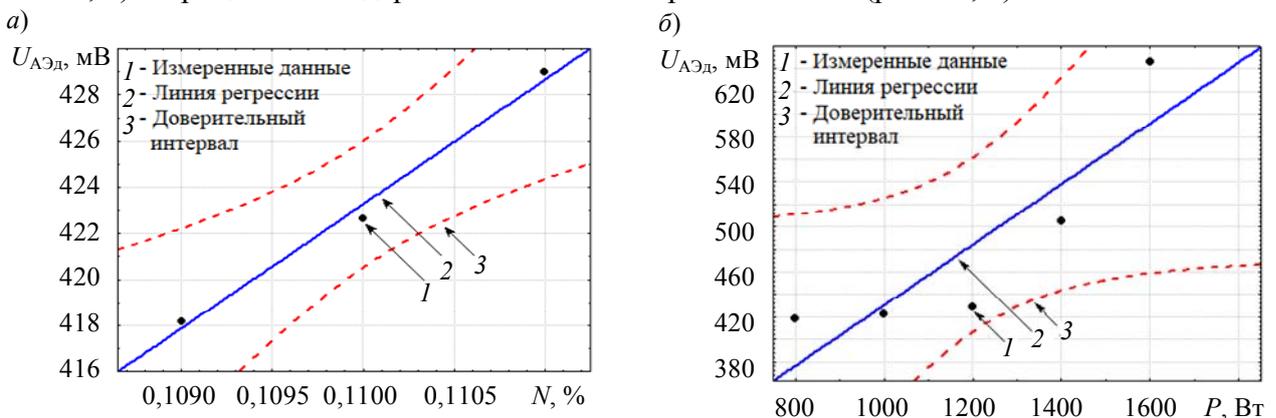


Рис. 11

Вид графических зависимостей, представленных на рис. 11, и результаты корреляционно-регрессионного анализа, представленные в табл. 4, свидетельствуют о том, что процентное содержание азота и мощность излучения лазера статистически значимо влияют на амплитуду дискретной АЭ.

Таблица 4

Результаты корреляционно-регрессионного анализа

Фактор	Показатели		Уровень влияния, %
	до обработки	после обработки	
Мощность лазера	$r = 0,292; R^2 = 0,085;$ $p = 0,632$	$r = 0,874; R^2 = 0,765;$ $p = 0,052$	76
Процентное содержание азота	$r = -0,579; R^2 = 0,335;$ $p = 0,606$	$r = 0,995; R^2 = 0,990;$ $p = 0,062$	99

Результаты корреляционно-регрессионного анализа (см. табл. 4) также свидетельствуют о том, что до применения разработанной схемы каскадной обработки из-за наличия помех существует слабая и отрицательная статистически незначимая корреляция, которая в два—три раза повышается после фильтрации.

Значения коэффициентов корреляции и статистической значимости между мощностью излучения лазера и амплитудой дискретной АЭ составили $r = 0,874$ при $p = 0,052$, а также $r = 0,995$ при $p = 0,062$ между процентным содержанием азота и амплитудой дискретной АЭ. Сопоставив эти данные с зависимостями на рис. 11, можно утверждать, что увеличение содержания азота в порошке ЭП648 и мощности излучения лазера на различных стадиях ПЛВ приведет к повышению амплитуды дискретной АЭ, характеризующей процесс дефектообразования. Значение коэффициента корреляции между предиктором и зависимой переменной составило более 0,8, что по оценочной шкале Чеддока считается весьма высокой и неслучайной взаимосвязью, так как $p < 0,1$.

В настоящей работе также проведена оценка корреляционной связи между амплитудой дискретной АЭ, вызванной порообразованием, трещинообразованием и помехами. Результаты показали, что между амплитудами АЭ при порообразовании и трещинообразовании также существует неслучайная высокая корреляционная связь $r = 0,896$, $R^2 = 0,804$ при $p = 0,039$. Наличие этой взаимосвязи характеризует структурные преобразования в материале образцов.

Важным представляется отсутствие четкой статистически незначимой связи между амплитудами дискретной АЭ, обусловленной дефектами и влияющей помехой. В работе [36] отмечается, что для преобразователей АЭ в диапазоне 250—400 кГц прослеживаются резонансные частоты от доминирующей частоты 160 кГц, обусловленной помехами, возникающими при движении манипулятора роботизированной установки ПЛВ. Отсутствие четкой взаимосвязи показателей $r = 0,211$ (от порообразования) при $p = 0,435$ и $r = 0,103$ (от трещинообразования) при $p = 0,597$ между амплитудой дискретной АЭ и помехой свидетельствует в пользу того, что частотные составляющие информативных сигналов дискретной АЭ отличимы от составляющих помех, следовательно, процесс не является коррелированным.

Корреляционная связь, обусловленная влиянием на амплитуду дискретной АЭ от дефектов, описывается уравнением линейной регрессионной модели (P — мощность, N — процентное содержание азота):

— для мощности лазера $U = 0,269P + 161,179$ при $r = 0,874$, $R^2 = 0,765$, $p = 0,052$;

— для содержания азота $U = 5394N + 170,072$ при $r = 0,995$, $R^2 = 0,990$, $p = 0,062$.

Результат регрессионного анализа позволяет сделать вывод, что при увеличении мощности лазера на 1 Вт следует ожидать повышения амплитуды на 0,269 мВ. Следовательно, при увеличении содержания азота на 1 % следует ожидать повышения амплитуды дискретной АЭ на 5,394 В. Металлографический анализ микрошлифов темплетов изготовленных изделий подтвердил влияние вышеперечисленных факторов на образование трещин и пор. На рис. 12 представлены изображения, полученные по результатам металлографического анализа микрошлифов темплетов образцов № 1 (а) и 5 (б).

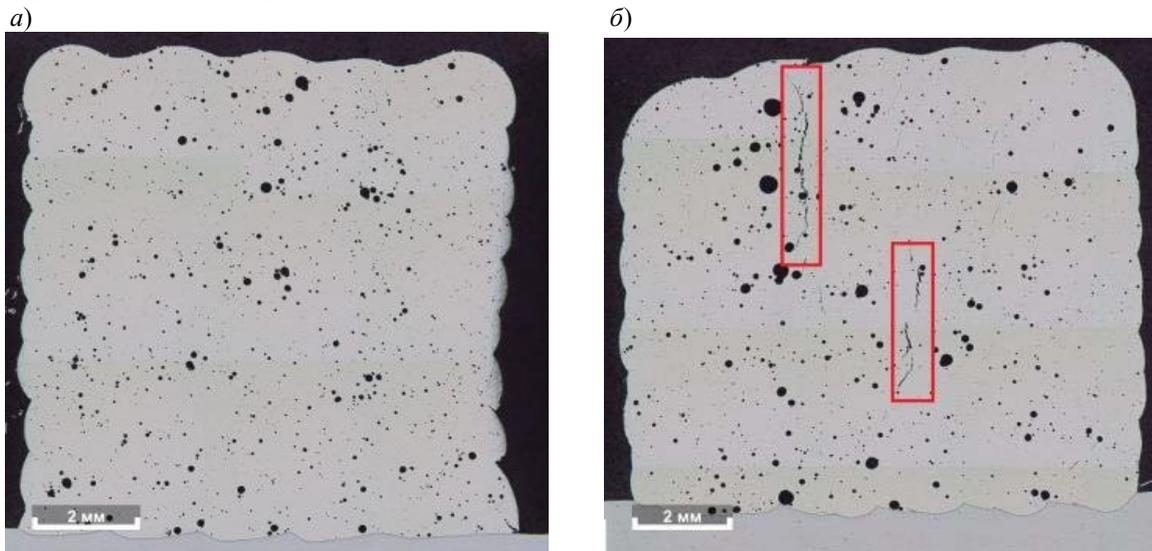


Рис. 12

Наличие трещин несложно заметить в микрошлифе образца № 5, который выращивался при $P = 1600$ Вт. Кроме того, наличие пустот в микрошлифах подтверждает образование пор, вызванное морфологией частиц (50 мкм) сферического порошка ЭП648. Влияние размера частиц порошка сплавов на образование пор подтверждено в работах [8].

Заключение. В настоящей статье представлены результаты акустико-эмиссионного контроля образования дефектов в образцах, изготовленных методом ПЛВ. Для обработки

данных АЭ-контроля предложено использовать метод каскадной фильтрации. Результаты апробации метода показали, что:

- значение показателя „отношение сигнал/помеха“ после фильтрации в среднем выше 1,5 дБ характеризует устойчивость сигналов АЭ к влияющей помехе;
- трехкратное возрастание коэффициента корреляции между мощностью излучения лазера и амплитудой дискретной АЭ, процентным содержанием азота и амплитудой дискретной АЭ после фильтрации характеризует результативность обработки;
- мощность излучения лазера и процентное содержание азота в исходном порошке материала оказывают влияние на процесс дефектообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ivanov A. D., Minaev V. L., Vishnyakov G. N.* Non-destructive optical testing of the products obtained using additive manufacturing // *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2019. Vol. 85. P. 76—82.
2. *Ковалевич А. С., Кинжагулов И. Ю., Степанова К. А., Кузиванов Д. О.* Экспериментальное исследование параметров акустической эмиссии при циклических испытаниях металлических изделий аддитивного производства // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2023. Т. 66, № 2. С. 139—147.
3. *Каплан М. А., Кирсанкин А. А., Смирнов М. А., Калайда Т. А., Севостьянов М. А.* Содержание примесей в образцах сферических порошков коррозионноустойчивых сталей // *Сб. матер. 4-го междисциплинарного науч. форума с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии"*. 2018. С. 130—131.
4. *Литунов С. Н., Слободенюк В. С., Мельников Д. В.* Обзор и анализ аддитивных технологий. Ч. 1 // *Омский научный вестник*. 2016. Т. 145, № 1. С. 12—17.
5. *Wei Q., Xie Y., Teng Q., Shen M., Sun S., Cai C.* Crack types, mechanisms, and suppression methods during high-energy beam additive manufacturing of nickel-based super alloys: a review // *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*. 2022. Vol. 1. P. 100055.
6. *Yang G., Xie Y., Zhao S., Qin L., Wang X., Wu B.* Quality control: internal defects formation mechanism of selective laser melting based on laser-powder-melt pool interaction: a review // *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*. 2022. P. 100037.
7. *Попкова И. С.* Селективное лазерное плавление как инновационная технология изготовления сложнопрофильных изделий // *Сб. XVI междунар. науч.-техн. Уральской школы металловедов-молодых ученых*. Ч. 2. Екатеринбург, 2015. С. 276—279.
8. *Zhang B., Li Y., Bai Q.* Defect formation mechanisms in selective laser melting: a review // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 30. P. 515—527.
9. *Grange D., Bartout J. D., Macquaire B., Colin C.* Processing a non-weldable nickel-base super alloy by selective laser melting: role of the shape and size of the melt pools on solidification cracking // *Materialia*. 2020. Vol. 12. P. 100686.
10. *Shahwaz M., Nath P., Sen I.* A critical review on the microstructure and mechanical properties correlation of additively manufactured nickel-based super alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. P. 164530.
11. *Смирнов М. А., Каплан М. А., Кирсанкин А. А., Калайда Т. А., Севостьянов М. А.* Фракционный анализ сферических порошков жаропрочных сплавов // *Сб. матер. 4-го междисциплинарного науч. форума с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии"*. 2018. С. 307—310.
12. *Каплан М. А., Кирсанкин А. А., Смирнов М. А., Севостьянов М. А.* Содержание примесей в сферических порошках из жаропрочных материалов // *Сб. матер. 4-го междисциплинарного науч. форума с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии"*. 2018. С. 131—132.
13. *Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Kannan V. P., Mpyoi D. K.* Acoustic emission and deep learning for the classification of the mechanical behavior of AlSi10Mg AM-SLM specimens // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. P. 189.
14. *Wang C., Tan X. P., Tor S. B., Lim C. S.* Machine learning in additive manufacturing: state-of-the-art and perspectives // *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 36. P. 101538.

15. *Барат В. А.* Развитие метода акустической эмиссии за счет автоматизации обработки данных, повышения помехоустойчивости и достоверности обнаружения трещиноподобных дефектов металлоконструкций: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2019. 40 с.
16. *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.
17. *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.
18. *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.
19. *Чернова В. В.* Разработка методики акустико-эмиссионного контроля дефектов на ранней стадии их развития в изделиях из композиционных материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2017. 21 с.
20. *Rastegaeva I. I., Rastegaev I. A., Agletdinov E. A.* The comparison of the main time-frequency transformations of spectral analysis of acoustic emission signals // Frontier Materials and Technologies. 2022. N 1. P. 49—60.
21. *Altay Y. A., Kremlev A. S.* Comparative analysis of ECG signal processing methods in the time-frequency domain // Proc. of the 2018 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2018. P. 1058—1062.
22. *Altay Y. A., Kuzivanov D. O.* Descriptive analysis and acoustic emission signals parameters assessments: signal processing data // Proc. of the 2023 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. St. Petersburg, 2023. P. 1320—1326.
23. *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.
24. *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.
25. *Smirnov M. A., Kaplan M. A., Sevostyanov M. A.* Receiving finely divided metal powder by inert gas atomization // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018. Vol. 347. P. 012033.
26. *Smirnov M. A., Kaplan M. A., Kirsankin A. A., Kalaida T. A., Nasakina E. O., Sevostyanov M. A.* Investigation of the properties of heat-resistant spherical powders // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 525. P. 012076.
27. *Tempelman J. R., Wachtor A. J., Flynn E. B., Depond P.J., Forien J. B., Guss G. M., Matthews M. J.* Detection of keyhole pore formations in laser powder-bed fusion using acoustic process monitoring measurements // Additive Manufacturing. 2022. Vol. 55. P. 102735.
28. Прямое лазерное выращивание [Электронный ресурс]: <http://www.ilwt-stu.ru/upload/publications/DMD_ru.pdf>.
29. *Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Vimalathithan P.* Acoustic emission descriptors for the mechanical behavior of selective laser melted samples: an innovative approach // Mechanics of materials. 2020. Vol. 148. P. 103448.
30. *Pandiyan V., Drissi-Daoudi R., Shevchik S., Masinelli G., Loge R., Wasmer K.* Analysis of time, frequency and time-frequency domain features from acoustic emissions during laser powder-bed fusion process // Procedia CIRP. 2020. Vol. 94. P. 392—397.
31. *Pandiyan V., Drissi-Daoudi R., Shevchik S., Masinelli G., Le-Quang T., Loge R., Wasmer K.* Semi-supervised monitoring of laser powder bed fusion process based on acoustic emissions // Virtual and Physical Prototyping. 2021. Vol. 16. P. 481—497.
32. *Алтай Е. А., Кремлев А. С.* Оценка точности обработки электрокардиосигнала методом каскадной широкополосной режекторной фильтрации // Вестн. Российского нового университета. Сер.: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2020. № 2. С. 18—28.
33. *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.

34. Махутов Н. А., Иванов В. И., Соколова А. Г., Васильев И. Е., Чернов Д. В., Скворцов Д. Ф., Бубнов М. А. Мониторинг разрушения волокон композитных материалов с применением системы акустической эмиссии, вибрoанализатора и высокоскоростной видеосъемки // Дефектоскопия. 2020. № 12. С. 14—23.
35. Фролов А. В., Мухина И. Ю., Дуюнова В. А., Уридия З. П. Влияние легирующих элементов и структурных факторов на жаропрочность магниевых сплавов // Тр. ВИАМ. 2015. № 9. С. 57—63.
36. Zhang W., Jia H., Gao G., Cheng X., Du P., Xu D. Backing layers on electroacoustic properties of the acoustic emission sensors // Applied Acoustics. 2019. Vol. 156. P. 387—393.

Сведения об авторах**Ельдос Алтай**

— канд. техн. наук; Национальный центр государственной научно-технической экспертизы, департамент государственной научно-технической экспертизы; главный менеджер; E-mail: aeldos@inbox.ru

Дмитрий Олегович Кузиванов

— аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: kuzivanovdmitry@gmail.com

Данила Александрович Рождественский

— Институт лазерных и сварочных технологий СПбГМТУ, отделение аддитивных технологий; специалист технологического отдела аддитивных технологий; E-mail: DanRo@alpost.ru

Максим Игоревич Санников

— Институт лазерных и сварочных технологий СПбГМТУ, отделение аддитивных технологий; инженер технологического отдела аддитивных технологий; E-mail: sannmaks96@gmail.com

Ксения Андреевна Степанова

— канд. техн. наук; Научно-технический центр „Эталон“; ведущий научный сотрудник; E-mail: ledy.xs93@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.04.23; одобрена после рецензирования 04.05.23; принята к публикации 28.08.23.

REFERENCES

- Ivanov A.D., Minaev V.L., Vishnyakov G.N. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2019, vol. 85, pp. 76–82.
- Kovalevich A.S., Kinzhagulov I.Yu., Stepanova K.A., Kuzivanov D.O. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 2(66), pp. 139–147, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-139-147. (in Russ.)
- Kaplan M.A., Kirsankin A.A., Smirnov M.A., Kalaida T.A., Sevostyanov M.A. *Novyye materialy i perspektivnyye tekhnologii* (New Materials and Advanced Technologies), Collection of materials of the 4th Interdisciplinary Scientific Forum with International Participation, 2018, pp. 130–131. (in Russ.)
- Litunov S.N., Slobodenyuk V.S., Melnikov D.V. *Omsk Scientific Bulletin*, 2016, no. 1(145), pp. 12–17. (in Russ.)
- Wei Q., Xie Y., Teng Q., Shen M., Sun S., Cai C. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2022, vol. 1, pp. 100055.
- Yang G., Xie Y., Zhao S., Qin L., Wang X., Wu B. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2022, pp. 100037.
- Popkova I.S. *Sbornik XVI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy Ural'skoy shkoly metallovedov-molodykh uchenykh* (Collection of the XVI International Scientific and Technical Ural School of Metallurgists and Young Scientists), Part. 2, Ekaterinburg, 2015, pp. 276–279. (in Russ.)
- Zhang B., Li Y., Bai Q. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, vol. 30, pp. 515–527.
- Grange D., Bartout J.D., Macquaire B., Colin C. *Materialia*, 2020, vol. 12, pp. 100686.
- Shahwaz M., Nath P., Sen I. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, pp. 164530.
- Smirnov M.A., Kaplan M.A., Kirsankin A.A., Kalaida T.A., Sevostyanov M.A. *Novyye materialy i perspektivnyye tekhnologii* (New Materials and Advanced Technologies), Collection of materials of the 4th Interdisciplinary Scientific Forum with International Participation, 2018, pp. 307–310. (in Russ.)
- Kaplan M.A., Kirsankin A.A., Smirnov M.A., Sevostyanov M.A. *Novyye materialy i perspektivnyye tekhnologii* (New Materials and Advanced Technologies), Collection of materials of the 4th Interdisciplinary Scientific Forum with International Participation, 2018, pp. 131–132. (in Russ.)
- Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Kannan V.P., Mpyoi D.K. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, p. 189.
- Wang C., Tan X.P., Tor S.B., Lim C.S. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 36, pp. 101538.
- Barat V.A. *Razvitiye metoda akusticheskoy emissii za schet avtomatizatsii obrabotki dannykh, povysheniya pomekhoustoychivosti i dostovernosti obnaruzheniya treshchinopodobnykh defektov metallokonstruktsiy* (Development of the Acoustic Emission Method by Automating Data Processing, Increasing Noise Immunity and Reliability of Detection of Crack-Like Defects in Metal Structures), Extended abstract of Doctor's thesis, Moscow, 2019, 40 p. (in Russ.)
- 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.
- Altay Y., Fedorov A.V., Stepanova K.A., Kuzivanov D.O. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 10(65), pp. 735–746, DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-735-746. (in Russ.)

18. Altay Y., Fedorov A.V., Stepanova K.A. *Control. Diagnostics*, 2022, no. 6(25), pp. 36–45. (in Russ.)
19. Chernova V.V. *Razrabotka metodiki akustiko-emissionnogo kontrolya defektov na ranney stadii ikh razvitiya v izdeliyakh iz kompozitsionnykh materialov* (Development of a Technique for Acoustic Emission Monitoring of Defects at an Early Stage of Their Development in Products Made of Composite Materials), Extended abstract of candidate's thesis, Tomsk, 2017, 21 p. (in Russ.)
20. Rastegaeva I.I., Rastegaev I.A., Agletdinov E.A. *The comparison of the main time-frequency transformations of spectral analysis of acoustic emission signals. Frontier Materials and Technologies*, 2022, no. 1, pp. 49–60.
21. Altay Y.A., Kremlev A.S. *Proc. of the 2018 IEEE conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering*, IEEE, 2018, pp. 1058–1062.
22. Altay Y.A., Kuzivanov D.O. *Proc. of the 2023 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, St. Petersburg, 2023, pp. 1320–1326.
23. Zakharov L.A., Martyushev D.A., Ponomareva I.N. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 253, pp. 23–32.
24. Elforjani M., Shanbr S. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2018, no. 7(65), pp. 5864–5871.
25. Smirnov M.A., Kaplan M.A., Sevostyanov M.A. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2018, vol. 347, pp. 012033.
26. Smirnov M.A., Kaplan M.A., Kirsankin A.A., Kalaida T.A., Nasakina E.O., Sevostyanov M.A. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 525, pp. 012076.
27. Tempelman J. R., Wachtor A.J., Flynn E.B., Depond P.J., Forien J.B., Guss, G.M., Matthews M. J. *Additive Manufacturing*, 2022, vol. 55, pp. 102735.
28. http://www.ilwt-stu.ru/upload/publications/DMD_ru.pdf. (in Russ.)
29. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Vimalathithan P. *Mechanics of materials*, 2020, vol. 148, pp. 103448.
30. Pandiyan V., Drissi-Daoudi R., Shevchik S., Masinelli G., Loge R., Wasmer K. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 94, pp. 392–397.
31. Pandiyan V., Drissi-Daoudi R., Shevchik S., Masinelli G., Le-Quang T., Loge R., Wasmer K. *Virtual and Physical Prototyping*, 2021, vol. 16, pp. 481–497.
32. Altay Y.A., Kremlev A.S. *Bulletin of the Russian New University Complex Systems: models, analysis and management*, 2020, no. 2, pp. 18–28. (in Russ.)
33. 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.)
34. Makhutov N.A., Sokolova A.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Skvortsov D.F., Bubnov M.A., Ivanov V.I. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2020, no. 12(56), pp. 960–970.
35. Frolov A.V., Muhina I.Yu., Duyunova V.A., Uridiya Z.P. *Proceedings of VIAM*, 2015, no. 9, pp. 57–63. (in Russ.)
36. Zhang W., Jia H., Gao G., Cheng X., Du P., Xu D. *Applied Acoustics*, 2019, vol. 156, pp. 387–393.

Data on authors

- | | |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Yeldos Altay | — PhD; National Center of Science and Technology Evaluation Department of Scientific and Technological Expertise; Chief Manager; E-mail: aeldos@inbox.ru |
| Dmitry O. Kuzivanov | — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: kuzivanovdmitry@gmail.com |
| Danila A. Rozhdestvensky | — St. Petersburg State Maritime Technical University, Institute of Laser and Welding Technologies, Department of Additive Technologies; Specialist of the Department; E-mail: DanRo@alpost.ru |
| Maksim I. Sannikov | — St. Petersburg State Maritime Technical University, Institute of Laser and Welding Technologies, Department of Additive Technologies; Engineer of the Department; E-mail: sannmaks96@gmail.com |
| Ksenia A. Stepanova | — PhD; Scientific and Technical Center Etalon; Leading Scientific Researcher E-mail: ledy.xs93@yandex.ru |

Received 16.04.23; approved after reviewing 04.05.23; accepted for publication 28.08.23.

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЖИДКОСТЕЙ
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ
ПРИ ПОМОЩИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА**

А. О. ЗЕНЕВИЧ¹, Т. М. МАНСУРОВ², Т. Г. КОВАЛЕНКО^{1*},
Е. В. НОВИКОВ¹, С. В. ЖДАНОВИЧ¹

¹Белорусская государственная академия связи, Минск, Беларусь
*tgkov@yandex.by

²Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Аннотация. Предложен простой в использовании способ идентификации жидкостей и определения концентрации растворенных в воде веществ, при реализации которого применяется короткое оптическое волокно (1—1,5 м) и не требуется сложное и дорогостоящее оборудование. Согласно предложенному способу, в оптическое волокно направляется оптическое излучение постоянной мощности и на этой же стороне волокна регистрируется мощность излучения, отраженного от удаленного торца данного волокна, погруженного в жидкость. Определено, что для реализации предложенного способа может быть использовано как одномодовое, так и многомодовое оптическое волокно с использованием длин волн оптического излучения 650, 850, 1310, 1490, 1550 и 1625 нм, причем применение длин волн 650 и 850 нм менее желательно ввиду большей погрешности измерения, чем для других длин волн. Показано, что предложенный способ может быть применен, в частности, для определения концентрации водных растворов сахара и изопропилового спирта.

Ключевые слова: оптическое волокно, датчик, коэффициент отражения, концентрация, раствор, оптическое излучение

Ссылка для цитирования: Зеневич А. О., Мансуров Т. М., Коваленко Т. Г., Новиков Е. В., Жданович С. В. Идентификация жидкостей и определение концентрации водных растворов при помощи оптического волокна // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 10. С. 869—875. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-869-875.

**IDENTIFICATION OF LIQUIDS AND DETERMINATION
OF AQUEOUS SOLUTIONS CONCENTRATION USING
OPTICAL FIBER**

A. O. Zenevich¹, T. M. Mansurov², T. G. Kovalenko^{1*}, E. V. Novikov¹, S. V. Zhdanovich¹

¹Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus
*tgkov@yandex.by

²Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Abstract. An easy-to-use method for identifying liquids and determining the concentration of substances dissolved in water is proposed, the method implementation uses short optical fiber (1–1.5 m) and does not require complex and expensive equipment. According to the proposed method, optical radiation of constant power is directed into the optical fiber, and on the same side of the fiber the power of the radiation reflected from the remote end of the fiber immersed in the liquid is recorded. It is deduced that to implement the proposed method, both single-mode and multimode optical fiber can be used using optical wavelengths of 650, 850, 1310, 1490, 1550 and 1625 nm, while the use of wavelengths 650 and 850 nm is less desirable due to greater measurement error than for other wavelengths. It is shown that the proposed method can be applied, in particular, to determine the concentration of aqueous solutions of sugar and isopropyl alcohol.

Keywords: optical fiber, sensor, reflection coefficient, concentration, solution, optical radiation

For citation: Zenevich A. O., Mansurov T. M., Kovalenko T. G., Novikov E. V., Zhdanovich S. V. Identification of liquids and determination of aqueous solutions concentration using optical fiber. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 10. P. 869—875 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-869-875.

Введение. В последнее время в системах мониторинга состояния объектов все чаще применяются датчики на основе оптического волокна [1—5]. По сравнению с другими видами датчиков, они обладают рядом преимуществ: электробезопасностью, невосприимчивостью к электромагнитным воздействиям, возможностью использования в сочетании с оптическими волокнами, по которым передаются данные о состоянии контролируемой среды или объекта.

Датчики на основе оптического волокна химически нейтральны и достаточно устойчивы к различным химическим воздействиям, они могут применяться для контроля состояния объектов хранения и использования легковоспламеняющихся и взрывоопасных веществ [6]. В связи с этим подобные датчики широко применяются в химической и пищевой промышленности для определения уровня жидкости в производственных емкостях и измерения концентрации растворов [7, 8].

В работе [9] предложен способ идентификации типа жидкостей и определения концентрации растворенных в воде веществ, основанный на использовании рефлектометрии погруженного в раствор оптического волокна. Отметим, однако, что для рефлектометров характерно наличие мертвых зон, т.е. таких участков оптического волокна, с которых нельзя получить информацию об уровне обратнорассеянного или отраженного сигнала [10], что приводит к необходимости использования достаточно протяженного волокна (≥ 100 м). Сам рефлектометр является сложным и дорогим устройством. Все это усложняет и удорожает применение такого способа идентификации.

Поэтому целью настоящей работы является создание простого в реализации способа идентификации жидкостей и определения концентрации растворенных в воде веществ, при котором используется короткое оптическое волокно (1—1,5 м) и не требуется применение сложного и дорогостоящего оборудования.

Экспериментальная установка. Сущность предлагаемого способа заключается в том, что в отрезок оптического волокна направляется оптическое излучение заданной постоянной мощности и на этой же стороне отрезка регистрируется мощность оптического излучения, отраженного от торца удаленной стороны отрезка оптического волокна.

По величине мощности оптического излучения, отраженной от торца оптического волокна, можно идентифицировать вид жидкости, в которую погружен этот торец. Это связано с тем, что разные жидкости имеют различающиеся показатели преломления оптического излучения и отличные от показателя преломления сердцевины оптического волокна. Поэтому в месте соприкосновения торца волокна с жидкостью часть оптического излучения выходит за пределы оптического волокна в жидкость, а другая часть — отражается от границы раздела сердцевины волокна и жидкости, поступая обратно в оптическое волокно. Величина мощности оптического излучения, вернувшейся в оптическое волокно, будет зависеть от разности показателей преломления жидкости и сердцевины оптического волокна.

Также по мощности оптического излучения, отраженного от торца оптического волокна, можно определить концентрацию растворенного в воде вещества, благодаря тому что от нее зависит показатель преломления раствора.

Отметим, что отражение части оптического излучения от торца отрезка волокна характерно и для оптического волокна, находящегося в воздухе.

Для реализации предлагаемого способа использовалась экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рис. 1 (НИ — набор источников оптического излучения, ИМ1 и ИМ2 — измерители мощности, ПЧ1 и ПЧ2 — патчкорды, Р — волоконно-оптический разветвитель, ОВ — оптическое волокно, Е — емкость с жидкостью).

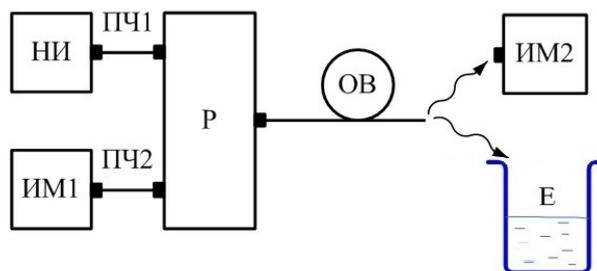


Рис. 1

В экспериментальной установке используется набор источников оптического излучения с $\lambda = 650, 850, 1310, 1490, 1550$ и 1625 нм. Такие значения длины волны соответствуют „окнам прозрачности“ оптических волокон. Исключением является длина волны 650 нм, использованная для оценки возможности применения при реализации данного способа оптического излучения видимого диапазона спектра. Мощность источников оптического излучения — 1 мВт.

Излучение от одного из источников направляется на один из входов двупроходного волоконно-оптического разветвителя Р. Для этого используется патчкорд ПЧ1. Излучение со входа волоконно-оптического разветвителя поступает на его выход, а затем — в оптическое волокно ОБ. Часть излучения, достигнув выхода оптического волокна, выходит за пределы волокна, а другая — отражается от торца волокна.

Отразившаяся часть мощности оптического излучения поступает на выход волоконно-оптического разветвителя Р, а затем в равных частях распределяется между двумя его входами.

Использование волоконно-оптического разветвителя Р с таким коэффициентом деления обеспечивает достаточную для регистрации величину мощности отраженного сигнала. При других коэффициентах деления необходимо увеличивать мощность оптического излучения источника с целью получения достаточной для регистрации мощности отраженного сигнала либо повышать чувствительность измерителя мощности.

Мощность оптического излучения на втором входе разветвителя измеряется измерителем мощности ИМ1, подключенным к разветвителю патчкордом ПЧ2.

При идентификации жидкостей и определении концентрации растворенных в воде веществ выход оптического волокна ОБ помещается в емкость Е с жидкостью или в водный раствор. Торцевой конец оптического волокна ОБ располагается в емкости на $2\text{—}3$ см ниже уровня жидкости.

Для измерения мощности оптического излучения на выходе оптического волокна используется измеритель ИМ2. При этом выходной конец ОБ извлекается из емкости Е с жидкостью.

В качестве измерителей мощности ИМ1 и ИМ2 использованы калиброванные и поверенные оптические многофункциональные приборы МТР 9000.

В процессе измерений определяется коэффициент отражения мощности оптического излучения от границы раздела сердцевины волокна и жидкости. Коэффициент отражения k характеризует способность объекта отражать падающее на него оптическое излучение:

$$k = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{п}}} \times 100 \%, \quad (1)$$

где $P_{\text{п}}$ — мощность оптического излучения, падающего на границу раздела сердцевины оптического волокна и окружающей среды; $P_{\text{отр}}$ — мощность оптического излучения, отраженного от границы раздела сердцевины оптического волокна и окружающей среды.

Значение $P_{\text{п}}$ определяется на основе мощности источника оптического излучения, подключенного к разветвителю Р, с учетом потерь мощности излучения на соединениях в экспериментальной установке. Потерей мощности оптического излучения в волокне можно пренебречь, поскольку длина отрезка волокна ОБ не более $1,5$ м, а наибольшая потеря мощности

в этом волокне 4 дБ/км. При определении величины $P_{отр}$ учитывается, что на измеритель мощности ИМ1 через разветвитель Р поступает только половина мощности обратно отраженного в оптическое волокно излучения.

Измерения выполнены согласно требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025-2019*, при этом контролировались условия окружающей среды: температура от 20 до 25 °С, влажность до 70 %, атмосферное давление от 975 до 1025 ГПа.

Результаты исследований и их обсуждение. В процессе исследований определен коэффициент отражения излучения от границы раздела воздуха и сердцевины одномодовых оптических волокон G652, G655, G657 и многомодового оптического волокна G651 для различных значений длины волны оптического излучения. Величина этого коэффициента оставалась постоянной для исследуемых длин волн — $k = 2,7 \%$. Это связано с тем, что показатель преломления сердцевины волокна был приблизительно одинаковым для всех рассматриваемых волокон и не зависел от длины волны или изменялся незначительно в рассматриваемом нами диапазоне длин волн излучения.

Согласно оценке, относительная погрешность измерения коэффициента отражения от границы раздела сердцевины оптического волокна и воздуха составляет: для $\lambda = 650$ нм — 5,2 %; 850 — 3,0; 1310 — 0,2; 1490 — 0,7; 1550 — 0,5; 1625 — 1,0. Погрешность измерения определялась в основном нестабильностью мощности используемого источника оптического излучения [11]. Как видно, наименьшая погрешность измерения для $\lambda = 1310$ нм. Наибольшая нестабильность мощности наблюдается для источников с $\lambda = 650$ и 850 нм, что связано с тем, что для генерации излучения с этими длинами волн применялся полупроводниковый лазер с резонаторами Фабри—Перо. Для генерации других длин волн использовались полупроводниковые лазеры с распределенными брэгговскими отражателями.

Полупроводниковые лазеры с резонаторами Фабри—Перо имеют поперечные собственные моды, искажающие спектр генерации лазера, что приводит к нестабильности мощности их излучения. Полупроводниковые лазеры с распределенными брэгговскими отражателями не имеют этого недостатка. В связи с этим такие лазеры имеют меньшую нестабильность мощности оптического излучения, чем лазеры с резонаторами Фабри—Перо [12—15].

Среди полупроводниковых лазеров с распределенными брэгговскими отражателями наименьшая нестабильность наблюдалась для лазеров с $\lambda = 1310$ нм. Поэтому далее для определения значений коэффициента отражения использовалась эта длина волны.

При выполнении исследований в качестве тестовых веществ использовались жидкости, имеющие различные показатели преломления (см. таблицу).

Данные о коэффициенте отражения от границы раздела сердцевины оптического волокна и жидкости

Вид жидкости	$k, \%$	$P_{отр}, \text{мкВт}$
Вода	0,18	1,86
Водный раствор изопропилового спирта 40 %-ный	0,12	1,29
Водный раствор сахара 40 %-ный	0,06	0,62
Глицерин	0,02	0,21

Экспериментальные данные, представленные в таблице, подтверждают наличие прямо пропорциональной зависимости между коэффициентом отражения жидкости и мощностью отраженного оптического излучения. Таким образом, предлагаемый способ, естественно, не позволяет выполнить химический анализ жидкости, но может быть использован для проверки наличия в емкости определенного вещества или примеси такого вещества в основном продукте.

Исследованы также зависимости мощности оптического излучения $P_{отр}$ от концентрации C водных растворов сахара и изопропилового спирта. Полученные результаты для

* ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 „Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий“.

$\lambda = 1310$ нм представлены на рис. 2 (1 — раствор изопропилового спирта; 2 — раствор сахара). Как видно из рис. 2, зависимости $P_{\text{отр}}$ от концентрации C в исследуемом диапазоне концентраций близки к линейным, причем увеличение концентрации раствора приводит к уменьшению $P_{\text{отр}}$. Такой характер зависимостей связан с тем, что с увеличением концентрации показатель преломления для раствора повышается, приближаясь к показателю преломления сердцевины оптического волокна. В результате уменьшается коэффициент отражения k , а значит, и величина $P_{\text{отр}}$.

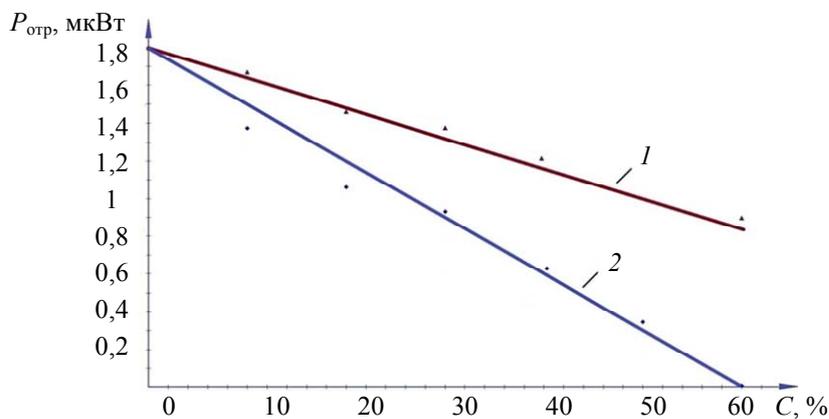


Рис. 2

Как следует из рис. 2, угол наклона зависимостей к горизонтальной оси различается для растворов сахара и изопропилового спирта. Это объясняется тем, что у этих растворов показатели преломления по-разному зависят от концентрации. Кривые выходят из одной точки, так как при $C = 0$ для всех растворов показатель преломления равен показателю преломления воды. При максимальной концентрации раствора изопропилового спирта показатель преломления не может превышать 1,377 [9]. Для концентрации раствора сахара в воде $C = 60\%$ его показатель преломления составляет 1,442 [9], что достаточно близко к показателю преломления сердцевины оптического волокна.

Отметим, что мощность оптического излучения $P_{\text{отр}}$ при изменении концентрации C варьирует таким же образом, как и информационный параметр, предложенный нами в работе [9]. При этом измерение мощности отраженного оптического излучения позволяет обеспечить более высокую чувствительность при определении концентрации вещества, по сравнению с ранее предложенным способом, использующим оптическую рефлектометрию [9].

Кроме того, рассматриваемый в настоящей работе подход может быть реализован на коротких отрезках оптического волокна (1—1,5 м), не требует использования такого сложного и дорогостоящего оборудования, как оптический рефлектометр, и упрощает обработку результатов измерений.

Заключение. Предложен простой в реализации способ идентификации жидкостей и определения концентрации растворенных в воде веществ. Сущность способа заключается в том, что в оптическое волокно направляется оптическое излучение постоянной мощности и на этой же стороне волокна регистрируется мощность оптического излучения, отраженного от погруженного в жидкость удаленного торца данного оптического волокна.

Определено, что для реализации предложенного способа может быть использовано как одномодовое, так и многомодовое оптическое волокно. При реализации способа может быть использовано оптическое излучение на длинах волн 650, 850, 1310, 1490, 1550 и 1625 нм. Однако использование оптического излучения 650 и 850 нм приводит к большей погрешности измерения, чем для другой длины.

Показано, что предложенный способ может быть применен, в частности, для определения концентрации водных растворов сахара и изопропилового спирта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов А. В., Игнатъев А. В. Обзор волоконно-оптических систем охраны периметра // Алгоритмы безопасности. 2010. № 4. С. 56—61.
2. Качура С. М., Постнов В. И. Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 5(77). С. 52—60.
3. Connolly C. Structural monitoring with fibre optics // Europhotonics. 2009. N 2—3. P. 16—18.
4. Franz J., Jain V. Optical communications. Components and Systems: analysis: design: optimization: application. CRC Press, 2000. 717 p.
5. Зеневич А. О., Жданович С. В., Новиков Е. В., Матковская Т. А., Коваленко Т. Г. Исследование возможности совмещения волоконно-оптической линии связи и системы мониторинга объекта // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 406—412.
6. Вяльцев А. И., Добров В. М., Долгов А. А., Бутов О. В., Плешков А. Ю. Волоконно-оптические датчики для контроля параметров состояния объектов и окружающей среды в задачах мониторинга // Природообустройство. 2014. № 3. С. 32—37.
7. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / Под ред. С. А. Дмитриева и Н. Н. Слепова. М.: Техносфера, 2010. 608 с.
8. Гулаков И. Р., Зеневич А. О. Волоконно-оптические датчики физических величин. Минск: Белорусская государственная академия связи, 2022. 367 с.
9. Зеневич А. О., Мансуров Т. М., Коваленко Т. Г., Новиков Е. В., Жданович С. В., Матковская Т. А. Использование оптического волокна как основы для создания датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. № 12. С. 895—901.
10. OTDR Dead Zone Explained: How to Eliminate Its Effect? // FS Community [Электронный ресурс]: <<https://community.fs.com/blog/otdr-optical-time-domain-reflectometer-dead-zone-tutorial.html>>. (19.03.2023).
11. Лагутик А. А., Матковская Т. А. Исследование влияния коэффициента ослабления аттенуатора на нестабильность мощности источника оптического излучения // Веснік сувязі. 2022. № 4. С. 54—57.
12. Веснин В. Л., Низаметдинов А. М., Иванов О. В., Черторийский А. А. Волоконно-оптические брэгговские решетки как спектрально-селективные элементы при обработке сигнала волоконно-оптического брэгговского датчика // Датчики и системы. 2018. № 3(223). С. 27—32.
13. Koeth J. J., Fischer M., Legge M., Seufert J., Werner R. Quantum well-, quantum dot-, and quantum cascade lasers with DFB-gratings. Photonik International, 2006. P. 60—63.
14. Werle P. Diode-Laser Sensors for in-situ Gas Analysis // Lasers in Environmental and Life Sciences – Modern Analytical Methods. Springer, Heidelberg, 2004. P. 223—243.
15. Лазерные источники с резонатором Фабри-Перо [Электронный ресурс]: <https://azimp.ru/catalogue/fabry_perot_lasers/>. (Дата доступа 19.03.2023).

Сведения об авторах

- Андрей Олегович Зеневич** — д-р техн. наук, профессор; Белорусская государственная академия связи; ректор; E-mail: a.zenevich@bsac.by
- Тофиг Магомедович Мансуров** — д-р техн. наук, профессор; Азербайджанский технический университет, кафедра радиотехники и коммуникации; E-mail: tofiq-mansurov@rambler.ru
- Татьяна Георгиевич Коваленко** — аспирант; Белорусская государственная академия связи; кафедра физических и математических основ информатики; E-mail: tgkov@yandex.by
- Евгений Владимирович Новиков** — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи, директор Института современных технологий связи; E-mail: e.novikov@bsac.by
- Сергей Вячеславович Ждапович** — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи; лаборатория перспективных информационно-коммуникационных технологий; заведующий лабораторией; E-mail: zsvzsv@tut.by

Поступила в редакцию 12.04.23; одобрена после рецензирования 15.05.23; принята к публикации 28.08.23.

REFERENCES

1. Kulikov A.V., Ignatiev A.V. *Algoritmy bezopasnosti* (Security algorithms), 2010, no. 4, pp. 56–61. (in Russ.)
2. Kachura S.M., Postnov V.I. *Trudy VIAM* (Proceedings of VIAM), 2019, no. 5(77), pp. 52–60. (in Russ.)
3. Connolly C. *Europhotonics*, 2009, no. 2-3, pp. 16–18.
4. Franz J., Jain V. *Optical communications. Components and Systems: analysis: design: optimization: application*, CRC Press, 2000, 717 p.
5. Zenevich A.O., Zhdanovich S.V., Novikov E.V., Matkovskaia T.A., Kovalenko T.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 6(65), pp. 406–412, DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-406-412. (in Russ.)
6. Vyalyshv A.I., Dobrov V.M., Dolgov A.A., Butov O.V., Pleshkov A.Yu. *Prirodoobustroystvo* (Environmental Management), 2014, no. 3, pp. 32–37 (in Russ.)
7. Dmitriyev S.A. *Volokonno-opticheskaya tekhnika: sovremennoye sostoyaniye i novyye perspektivy* (Fiber Optic Technology: Current State and New Prospects), Moscow, 2010, 608 p. (in Russ.)
8. Gulakov I.R., Zenevich A.O. *Volokonno-opticheskiye datchiki fizicheskikh velichin* (Fiber-Optic Sensors of Physical Quantities), Minsk, 2022, 367 p. (in Russ.)
9. Zenevich A.O., Mansurov T.M., Kovalenko T.G., Novikov E.V., Zhdanovich S.V., Matkovskaia T.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 12(65), pp. 895–901, DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-895-901. (in Russ.)
10. OTDR Dead Zone Explained: *How to Eliminate Its Effect?*, <https://community.fs.com/blog/otdr-optical-time-domain-reflectometer-dead-zone-tutorial.html>.
11. Lagutik A. A., Matkovskaya T.A. *Vestnik Communications*, 2022, no. 4, pp. 54–57. (in Russ.)
12. Vesnin V.L., Nizametdinov A.M., Ivanov O.V., Chertoriysky A.A. *Sensors and systems*, 2018, no. 3(223), pp. 27–32. (in Russ.)
13. Koeth J.J., Fischer M., Legge M., Seufert J., Werner R. *Quantum well-, quantum dot-, and quantum cascade lasers with DFB-gratings*, Photonik International, 2006, pp. 60–63.
14. Werle P. *Lasers in Environmental and Life Sciences – Modern Analytical Methods*, Springer, Heidelberg, 2004, pp. 223–243.
15. https://azimp.ru/catalogue/fabry_perot_lasers/. (in Russ.)

Data on author

Andrey O. Zenevich	—	Dr. Sci., Professor; Belarusian State Academy of Communications; Rector; E-mail: a.zenevich@bsac.by
Tofiq M. Mansurov	—	Dr. Sci., Professor; Azerbaijan Technical University, Department of Radio Engineering and Communication; E-mail: tofiq-mansurov@rambler.ru
Tatiana G. Kovalenko	—	Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications, Department of Physical and Mathematical Foundations of Computer Science; E-mail: tgkov@yandex.by
Evgeny V. Novikov	—	PhD; Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications, Institute of Modern Communication Technologies; Director of the Institute; E-mail: e.novikov@bsac.by
Sergey V. Zhdanovich	—	PhD; Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications; Laboratory of Perspective Information and Communication Technologies; Head of the Laboratory; E-mail: zsvzsv@tut.by

Received 12.04.23; approved after reviewing 15.05.23; accepted for publication 28.08.23.

**ПРИМЕНЕНИЕ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

М. Н. ЛЮТИКОВА*, С. М. КОРОБЕЙНИКОВ, А. В. РИДЕЛЬ

*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия,
m.lyutikova@mail.ru

Аннотация. Разработана и апробирована основанная на ИК-спектроскопии методика контроля качества диэлектрических жидкостей (изоляционное минеральное масло, сложноэфирная диэлектрическая жидкость Midel 7131, а также смеси масла с содержанием эфира 10, 20 и 30 % об.) в процессе их старения. ИК-спектры снимались на инфракрасном фурье-спектрометре ФТ-801 производства НПФ „СИМЕКС“. Анализ проб масла и смесей на основе эфира проводился без предварительной подготовки на приставке многократного нарушенного полного внутреннего отражения с элементом из селенида цинка и встроенной системой визуализации. Результаты исследований показали, что по мере добавления синтетического эфира в масло на ИК-спектре смеси фиксируется увеличение интенсивности полос поглощения, обусловленных валентными колебаниями связей CO–C, C–O, C–O–C, C(=O)–O–C. Особенно заметно изменяется интенсивность характерного для сложных эфиров пика на частоте 1161 см^{-1} (C(=O)–O–C). Установлено, что в ходе окисления эфиромасляных смесей интенсивность характеристических полос карбонильной группы C=O (1747 см^{-1}) и сложноэфирной группы C(=O)–O–C (1161 см^{-1}) снижается, в то время как интенсивность поглощения в области частот СН-группы (2920 см^{-1}) остается практически неизменной. Оценивать степень разложения смесей сложноэфирной диэлектрической жидкости, а также эфиромасляных смесей предложено с помощью „индекса деструкции“, который рассчитывается по формуле, учитывающей изменение оптической плотности на полосе групп C=O и C(=O)–O–C. Этот показатель позволит на количественном уровне контролировать качество альтернативных сложноэфирных жидкостей и эфиромасляных смесей в процессе их эксплуатации.

Ключевые слова: минеральное изоляционное масло, сложноэфирная диэлектрическая жидкость, эфиромасляные смеси, ИК-спектроскопия, индекс деструкции, индекс окисленности

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10198, <https://rscf.ru/project/22-79-10198/>.

Ссылка для цитирования: Лютикова М. Н., Коробейников С. М., Ридель А. В. Применение ИК-спектроскопии для контроля качества жидких диэлектриков // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 10. С. 876—886. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-876-886.

**APPLICATION OF IR SPECTROSCOPY
FOR QUALITY CONTROL OF LIQUID DIELECTRIC**

M. N. Lyutikova*, S. M. Korobeinikov, A. V. Ridel

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
m.lyutikova@mail.ru*

Abstract. A method based on IR spectroscopy for quality control of dielectric liquids (insulating mineral oil, ester dielectric liquid Midel 7131, as well as oil mixtures with an ether content of 10, 20 and 30% vol.) during their aging, are developed and tested. IR spectra are recorded on an FT-801 IR-Fourier spectrometer manufactured by Simeks Research and Production Company. Analysis of oil samples and ester-based mixtures is carried out without prior preparation on the MFTIR (multiple frustrated total internal reflection) attachment with a zinc selenide ZnSe element and a built-in visualization system on an external monitor. Results of the research show that as synthetic ester is added to the oil, the IR spectrum of the mixture demonstrates an increase in the intensity of absorption bands caused by stretching vibrations of the bonds CO–C, C–O, C–O–C, C(=O)–O–C. The intensity of the peak characteristic of esters at a frequency of 1161 cm^{-1} (C(=O)–O–C) changes especially noticeably. It is revealed that during the essential oil mixtures oxidation, the intensity of characteristic bands of the carbonyl group C=O (1747 cm^{-1}) and the ester group C(=O)–O–C (1161 cm^{-1}) decreases, while the absorption intensity in the frequency range of the CH group (2920 cm^{-1}) remains practically unchanged. It is proposed to evaluate the degree of decomposition of mixtures of ester dielectric liquid, as well as essential oil mixtures, using the “destruction index”, which is calculated using a formula that takes into account the change in opti-

cal density in the band of the C=O and C(=O)–O–C groups. This indicator is anticipated to allow for quantitative control of the quality of alternative ester liquids and essential oil mixtures during their service.

Keywords: mineral insulating oil, ester dielectric liquid, essential oil mixtures, IR spectroscopy, degradation index, oxidation index

Acknowledgment: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-79-10198, <https://rscf.ru/project/22-79-10198/>.

For citation: Lyutikova M. N., Korobeinikov S. M., Ridel A.V. Application of IR spectroscopy for quality control of liquid dielectric. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 10. P. 876—886 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-876-886.

Введение. Инфракрасная спектроскопия (ИК-спектроскопия) является современным методом исследования веществ, позволяющим получить информацию о структуре молекулы и характере связей в ней. Метод широко применяется для решения самых разных задач при исследовании структурно-группового состава нефтепродуктов, в том числе трансформаторного масла.

ИК-спектры представляют собой сложные кривые с большим числом максимумов и минимумов, индивидуальные для каждого анализируемого вещества, что и определяет их ценность при идентификации и изучении строения соединений. По характеристическим полосам (интенсивные полосы поглощения, характерные для определенной структурной группы в молекуле) можно быстро и надежно идентифицировать разнообразные функциональные группы и различные непредельные фрагменты и, следовательно, предположить структуру соединений. Используя основные характеристики ИК-спектров веществ (положения максимумов полос, их полуширина, интенсивность), возможно выполнить количественный анализ с хорошими метрологическими параметрами.

Методы ИК-спектроскопии позволяют в одной пробе одновременно отслеживать несколько параметров, включая актуальные для эксплуатационных свойств характеристики изоляционных масел на основе нефти: определять наличие присадок (в том числе ионов) и их концентрацию [1—4]*, кислотное число [3, 5, 6], ароматические соединения**, структурно-групповой состав [7].

В большей части перечисленных методик используются ближняя (400—13 000 см⁻¹) и дальняя (10—400 см⁻¹) области ИК-спектра. Между тем наиболее информативной является средняя, или фундаментальная, область ИК-спектра (400—4000 см⁻¹), в которой совершается большинство колебательных переходов в молекулах органических соединений. Интерпретация ИК-спектров в данной области позволяет однозначно идентифицировать многие функциональные группы (C=O, O–H, N–H, S–H и др.), а также различные типы связей углерод—водород (C_{sp3}–H, C_{sp2}–H, C_{sp}–H, (O=)C–H), углерод—углерод (C=C, C≡C и др.), ароматические или гетерогенные структуры.

На основе фундаментальной ИК-спектрометрии предложено несколько методик для оценки степени окисления трансформаторного масла [8—11]. Однако эти методики базируются на качественном определении продуктов окисления масла по полосам интенсивности в диапазоне частот 1700—1800 см⁻¹, характерным для кислородсодержащих соединений с карбонильной группой C=O (альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты, сложные эфиры). Кроме того, перечисленные методики разработаны для контроля качества трансформаторного

* ГОСТ Р МЭК 60666-2013 Масла изоляционные нефтяные. Обнаружение и определение установленных присадок. М.: Стандартинформ, 2014. 28 с.; ASTM D2668-07(2013) Standard Test Method for 2,6-di-tert-Butyl-p-Cresol and 2,6-di-tert-Butyl Phenol in Electrical Insulating Oil by Infrared Absorption. 2013. 6 p.

** IEC 60590 Determination of the aromatic hydrocarbon content of new mineral insulating oils. IEC, 1986. 8 p.; ГОСТ 28640-90 (МЭК 590-77) Масла минеральные электроизоляционные. Метод определения ароматических углеводородов. М.: Стандартинформ, 2005. 7 с.

масла, как свежего, так и в процессе эксплуатации. Между тем, мировая электроэнергетика все больше обращает внимание на альтернативные диэлектрики — синтетические и натуральные сложноэфирные жидкости. В отличие от минерального масла, сложноэфирные жидкости поддаются биологическому разложению, нетоксичны, безопасны для окружающей среды и здоровья человека, производятся из возобновляемого сырья, обладают высокой огнестойкостью. В настоящее время на рынке имеется достаточное количество разных сложноэфирных жидкостей, обладающих превосходными изоляционными свойствами. Однако по ряду причин изготовители трансформаторного оборудования, а также эксплуатирующие организации пока не готовы к массовому переходу на биоразлагаемые сложноэфирные диэлектрические жидкости. Одной из таких причин является отсутствие методики оценки состояния жидкостей и, следовательно, контроля изменения их электроизоляционных свойств во время эксплуатации в высоковольтном оборудовании.

Поэтому целью настоящего исследования явилась апробация разработанной нами методики, основанной на ИК-спектроскопии, для количественной оценки степени деструкции диэлектрических жидкостей (трансформаторное масло, сложноэфирная синтетическая жидкость, а также смеси масла с содержанием эфира 10—30 % об.) в процессе их старения.

Экспериментальная часть. *Объект анализа.* На ИК-спектральный анализ были взяты пробы изоляционных жидкостей (масло ТКп, синтетический сложный эфир Midel 7131, а также их смеси) до и после окисления.

В отличие от других марок масел, широко применяемых в электрооборудовании — ГК (парафиновое), ВГ (парафиновое), Nyrto 11GX (нафтенное) и др., масло ТКп характеризуется повышенным содержанием ароматических углеводородов (более 15 %). В силу этого оно обладает повышенной способностью образовывать осадки при длительном окислении, что препятствует надежной работе электрооборудования. Синтетический эфир Midel 7131 представляет собой сложный эфир четырехатомного спирта — пентаэритрита и карбоновых кислот числом атомов углерода от C_5 до C_{22} . Структура карбоксильных радикалов может быть как линейной, так и изомерной. Кроме того, все четыре сложноэфирные связи пентаэритрита могут содержать одни и те же жирные кислоты ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4$) или четыре разных радикала ($R_1 \neq R_2 \neq R_3 \neq R_4$) [12, 13]. Как показали исследования [13—15], добавление синтетического эфира к маслу ТКп значительно улучшает его характеристики.

В работах [13—16] показано, что смеси трансформаторного масла с долей синтетического эфира 10, 20 и 30 % об. наиболее подходят в качестве изолирующей и теплоотводящей среды для высоковольтного оборудования. Измеренные показатели этих смесей соответствуют требованиям, предъявляемым к изоляционному маслу на нефтяной основе.

Подготовка проб и моделирование условий старения жидкостей. Трансформаторное масло перед приготовлением смесей очищалось от воды, механических примесей, растворенных газов; затем в определенных пропорциях смешивалось с синтетической сложноэфирной жидкостью Midel 7131, которая поставляется в канистрах под вакуумом, т.е. с минимальным содержанием воды (до 10 г/т) и воздуха (до 1 %). Перед проведением лабораторного старения диэлектрические жидкости (ММ — доля минерального масла в смеси 100 % об., СЭ — синтетического эфира 100 % об.; ММ(90):СЭ(10), ММ(80):СЭ(20), ММ(70):СЭ(30) — в скобках указана доля соответствующего вещества) заливались в стеклянные бутылки из боросиликатного стекла. Жидкости были разделены на две партии. В партии I доля кислорода, растворенного в образцах жидких диэлектриков, составила не более 3—4 % об. На протяжении всего периода старения бутылки оставались открытыми для свободного доступа воздуха к поверхности масла. Партия II масла, эфира и их смесей была дегазирована повторно. Доля кислорода, растворенного в жидкостях, не более 1 % об. После заливки дегазированных жидкостей бутылки закрывались герметично пробками. Старение обеих партий происходило при темпе-

ратуре 100 °С на протяжении 2000 ч. Через заданные промежутки времени по описанной ниже методике определялись характеристики проб.

Оборудование и методика измерения. ИК-спектры снимали на инфракрасном фурье-спектрометре ФТ-801 производства НПФ „СИМЕКС“ (Россия, Новосибирск). Анализ проб масла и смесей на основе эфира проводился без предварительной подготовки на приставке МНПВО (многократного нарушенного полного внутреннего отражения) с элементом из селенида цинка и встроенной системой визуализации на внешнем мониторе. Проба жидкости объемом $\approx 1 \text{ мм}^3$ наносилась на поверхность кристаллической подложки на верхней панели так, чтобы размер пленки составлял не менее $0,5 \text{ см}^2$ (диаметр пятна фокусировки 3 мм). Спектральный диапазон от 400 до 4000 см^{-1} , спектральное разрешение 4 см^{-1} , число сканов в секунду — 25. Съемка спектров анализируемых проб жидкостей выполнялась в автоматическом режиме. Для управления прибором и обработки спектров использовалась специализированная программа ZalR 3.5. Для проведения количественного анализа использовалась приставка РЖК с регулировкой толщины слоя по спектру поглощения в режиме онлайн. Количественный экспресс-анализ жидкостей проводился без пробоподготовки. Пробу жидкости наносили на одну из закрепленных в держателе подложек, оба держателя вставляли в приставку и плавно сдвигали с помощью винтов на верхней панели до появления спектра нужного качества (в процессе регулировки программа демонстрирует спектр в режиме реального времени). По окончании анализа образец удалялся с кристалла и подложек ватным тампоном, смоченным в спирте.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 1—6 показаны ИК-спектры масла ТКп, синтетического эфира Midel 7131, а также их смесей до и после термического окисления при температуре 100 °С в течение 2000 ч (τ — пропускание, ν — волновое число).

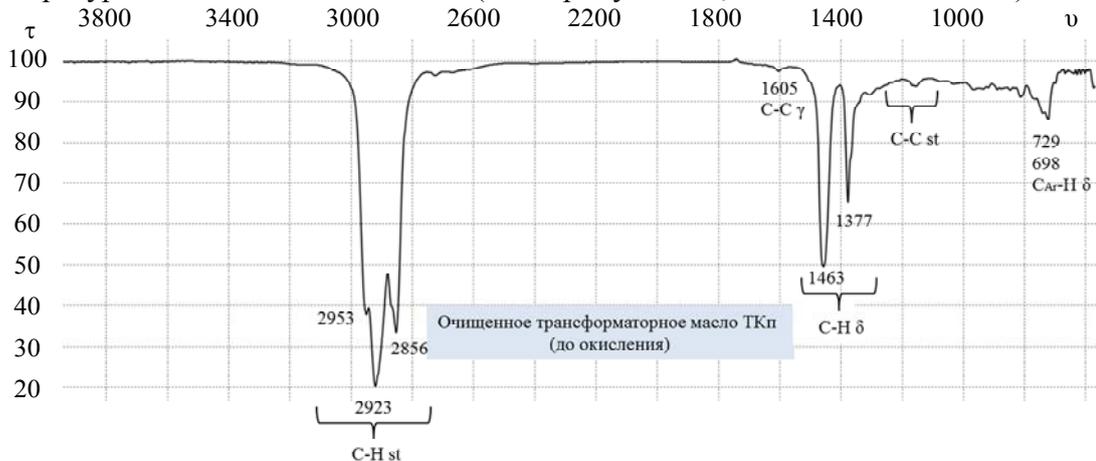


Рис. 1

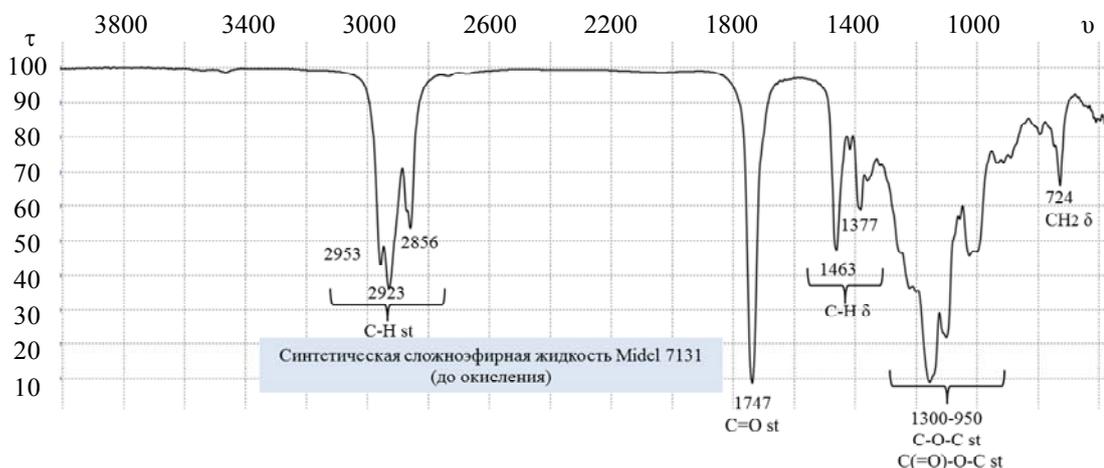


Рис. 2

Спектры исследованных образцов чистого трансформаторного масла ТКп (рис. 1) и неиспользованной синтетической сложноэфирной жидкости Midel 7131 (рис. 2) состоят из ряда изолированных линий и полос, которые можно отнести к двум группам. Первая группа — линии, общие для всех минеральных масел на нефтяной основе (724, 1377, 1463, 2800—3000 см^{-1}), т.е. характерный спектр предельного углеводорода. Похожая группа линий и полос в этих же областях ИК-спектра наблюдается для синтетического эфира Midel 7131. Ко второй группе относятся индивидуальные совокупности линий, характерные для каждой жидкости (минеральное масло, синтетический эфир), по которым можно ее идентифицировать. Эти сгруппированные в спектре преимущественно в области 800—1800 см^{-1} линии возникают из-за различия химического состава и наличия дополнительных компонентов (например, присадки). В частности, ИК-спектр минерального масла (рис. 1) демонстрирует полосу поглощения на частоте 1605 см^{-1} — скелетные колебания С–С-цикла ароматических углеводородов. Полосы поглощения переменной интенсивности в области „отпечатков пальцев“ 900—1300 см^{-1} на ИК-спектре диэлектрической жидкости Midel 7131 (рис. 2) могут указывать на наличие соединений, имеющих в составе молекулы связи С–С (пирролы), С–О (спирты и фенолы), С–О–О (перекиси и гидроперекиси), С–О–С (простые эфиры, ацетали, кетали), С–О–С (ангидриды кислот), С(=О)–О–С (сложные эфиры). По мере добавления синтетического эфира в масло на ИК-спектре смеси также фиксируются данные полосы поглощения (рис. 3), и чем больше доля эфира в смеси, тем выше интенсивность полос, обусловленных валентными колебаниями связей С–С, С–О, С–О–С, С(=О)–О–С. Особенно заметно изменяется интенсивность пика 1161 см^{-1} (С(=О)–О–С), характерного для сложных эфиров. Интенсивность полосы поглощения карбонильной группы С=О на частоте 1747 см^{-1} также изменяется при добавлении эфира в минеральное масло — уменьшается.

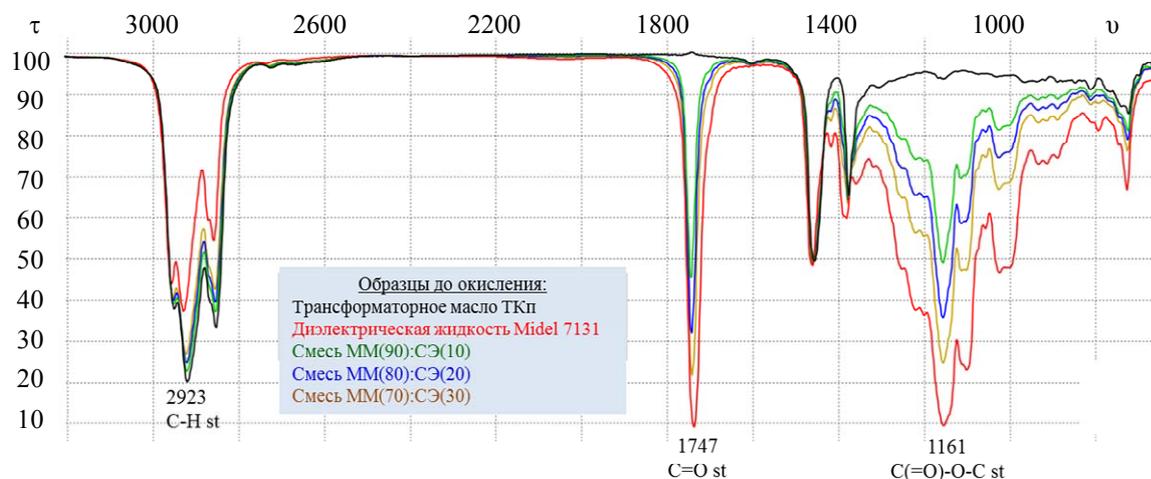


Рис. 3

На ИК-спектре (рис. 4) видно, что по мере старения трансформаторного масла ТКп увеличиваются интенсивности пиков 1747 и 1161 см^{-1} . Возрастание первого пика связано с появлением в масле продуктов окисления (альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты, сложные эфиры). Увеличение второго пика свидетельствует об образовании сложных эфиров по мере термоокислительного старения масла. Оба пика служат признаком деградации масла. При старении масла в герметичных условиях интенсивность пиков изменяется незначительно.

Стоит заметить: интенсивность поглощения в области частот СН-группы (2923 см^{-1}) остается практически неизменной по мере старения масла ТКп. Обнаруженные закономерности можно использовать для определения степени окисленности минерального масла в процессе его эксплуатации в высоковольтном маслонаполненном электрооборудовании. В качестве количественной характеристики для оценки степени окисления масла введем такую величину,

как индекс окисленности (ИО). Расчет индекса окисленности минерального масла (ИО_{ММ}) будем проводить по формуле:

$$\text{ИО}_{\text{ММ}} = \frac{D_{\text{C=O}} + D_{\text{C(=O)-O-C}}}{D_{\text{C-H}}} = \frac{D_{1747} + D_{1161}}{D_{2923}}, \quad (1)$$

где $D_{\text{C=O}}$ — оптическая плотность полосы поглощения 1747 см^{-1} , характерная для продуктов окисления масла, содержащих карбонильную группу (альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты, сложные эфиры); $D_{\text{C(=O)-O-C}}$ — оптическая плотность полосы поглощения 1161 см^{-1} , характерная для алифатических эфиров; $D_{\text{C-H}}$ — оптическая плотность на полосе поглощения 2923 см^{-1} , характерной для предельных углеводородов (алканов).

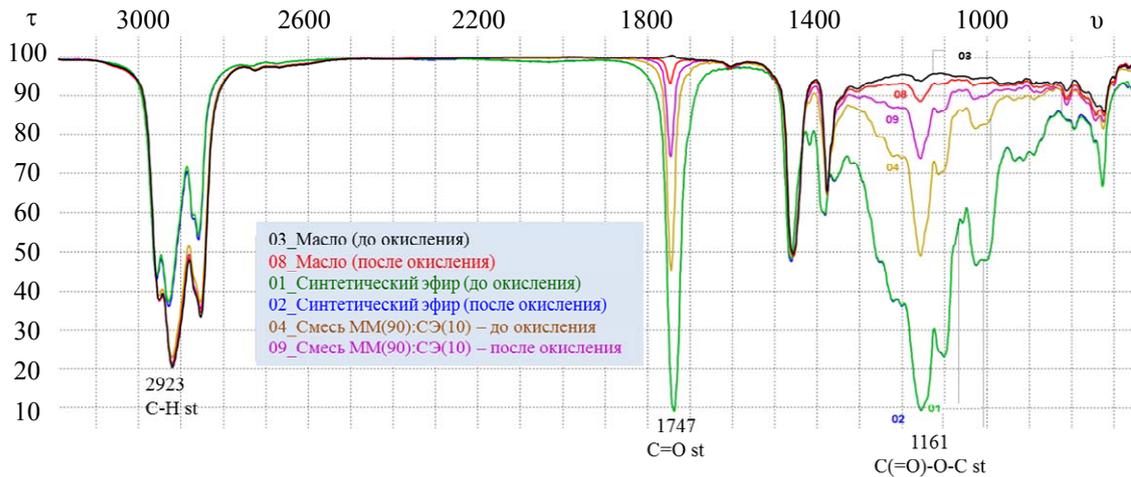


Рис. 4

Важно отметить, что результаты, полученные методом ИК-спектроскопии, согласуются с результатами, полученными с помощью кислотно-основного титрования — кислотное и эфирное числа масла ТКп по мере его старения повышаются [15].

Если интенсивность характеристических полос карбонильной C=O (1747 см^{-1}) и сложноэфирной C(=O)-O-C (1161 см^{-1}) групп трансформаторного масла по мере его старения увеличивается, то для ММ(95):СЭ(5), ММ(90):СЭ(10), ММ(80):СЭ(20) и ММ(70):СЭ(30) наблюдается обратная тенденция — доля сложных эфиров уменьшается (рис. 4—6). Последнее указывает на разрушение сложноэфирных связей в основных молекулах жидкости Midel 7131, что согласуется с результатами [15] — эфирное число масла эфиромасляных смесей в процессе их старения снижается, а кислотное число — увеличивается.

В ИК-спектрах смесей масла ТКп и диэлектрического эфира Midel 7131 имеются характеристические полосы поглощения, связанные с деформационными колебаниями групп CH ($1470\text{—}1390, 2920 \text{ см}^{-1}$) и C=O ($1700\text{—}1800 \text{ см}^{-1}$). Положение полос во времени не изменяется. При этом степень окисленности смесей существенно отражается на интенсивности поглощения полосы карбонильной C=O (1747 см^{-1}) и сложноэфирной C(=O)-O-C (1161 см^{-1}) групп, тогда как интенсивность поглощения в области частот CH -группы (2920 см^{-1}) остается практически неизменной. Поскольку в процессе термоокисления изоляционных смесей ММ(95):СЭ(5), ММ(90):СЭ(10), ММ(80):СЭ(20), ММ(70):СЭ(30) интенсивность полосы поглощения группы C=O и сложноэфирной группы C(=O)-O-C (1161 см^{-1}) снижается, что связано с гидролизом сложных эфиров синтетической жидкости Midel 7131, правильнее говорить о *степени деструкции*. Поэтому для оценки степени разложения смесей масла и эфира введем понятие индекса деструкции (ИДСМ), который будем рассчитывать по формуле, учитывающей изменение значений оптической плотности на полосе групп C=O и C(=O)-O-C :

$$\text{ИД}_{\text{СМ}} = \frac{\Delta D_{\text{C=O}} + \Delta D_{\text{C(=O)-O-C}}}{D_{\text{C-H}} + D_{\text{C=O}} + D_{\text{C(=O)-O-C}}} = \frac{\Delta D_{1747} + \Delta D_{1161}}{D_{2923} + D_{1747} + D_{1161}}, \quad (2)$$

где $\Delta D_{1747} = D_{1747}^1 - D_{1747}^2$ ($D_{\text{C-H}}$ — оптическая плотность полосы поглощения 1747 см^{-1} , характерная для сложноэфирных соединений изоляционных смесей минерального масла и синтетического эфира Midel 7131; D_{1747}^1 — значение оптической плотности до окисления, D_{1747}^2 — значение оптической плотности после окисления); $\Delta D_{1161} = D_{1161}^1 - D_{1161}^2$ ($D_{\text{C(=O)-O-C}}$ — оптическая плотность полосы поглощения 1161 см^{-1} , характерная для алифатических эфиров; D_{1161}^1 — значение оптической плотности до окисления, D_{1161}^2 — значение оптической плотности после окисления); $D_{\text{C-H}}$ — оптическая плотность полосы поглощения 2923 см^{-1} , характерная для предельных углеводородов (алканов)).

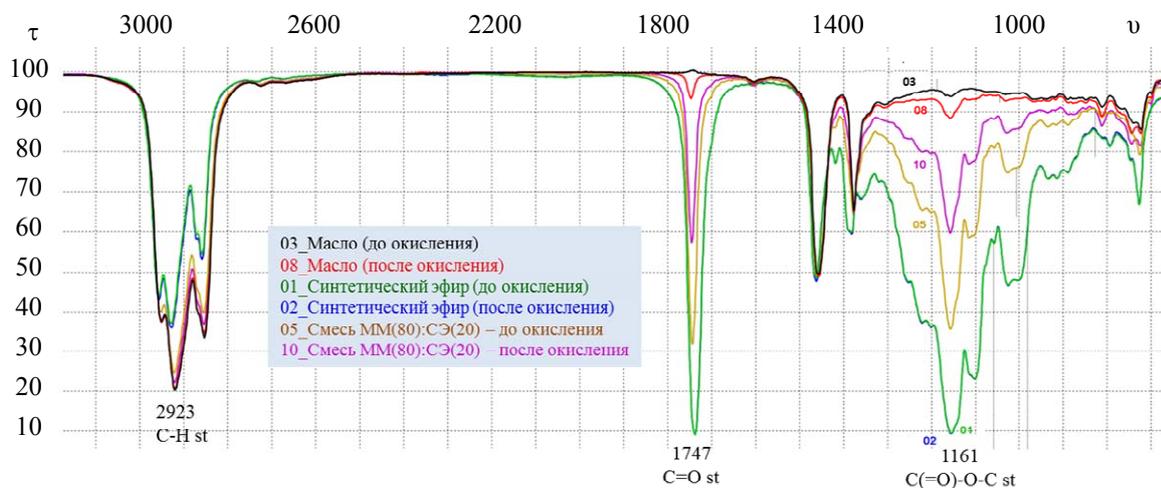


Рис. 5

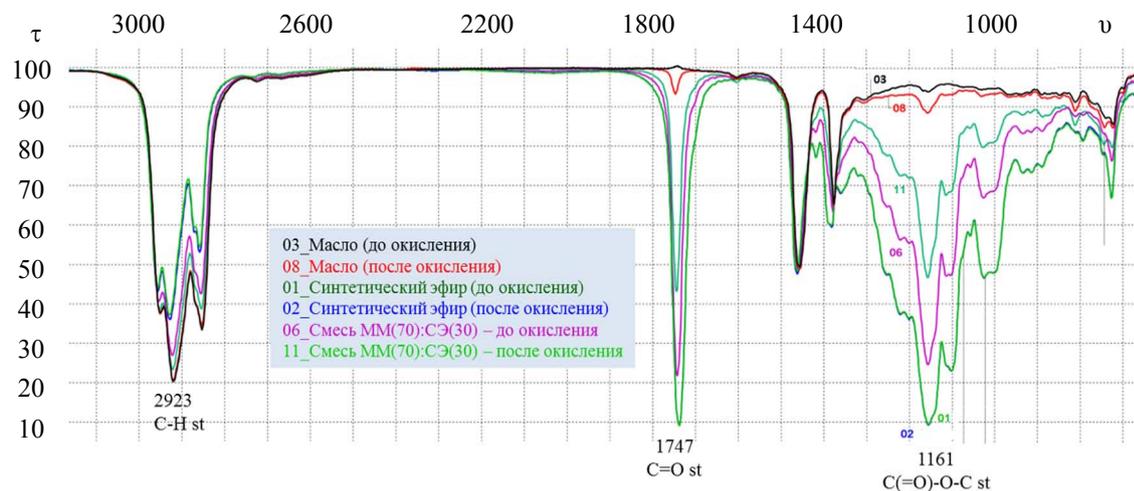


Рис. 6

Интенсивность полос поглощения сложноэфирной жидкости Midel 7131 (рис. 4—6) до и после продолжительного нагревания с доступом воздуха при температуре $100 \text{ }^\circ\text{C}$ во всем диапазоне ИК-спектра не изменяется, что указывает на высокую термоокислительную стабильность диэлектрической жидкости Midel 7131. Тем не менее, для расчета индекса деструкции синтетического эфира ($\text{ИД}_{\text{СЭ}}$) правильнее использовать формулу (2).

Таблица 1

**Индексы окисленности и деструкции изоляционных жидкостей
в процессе продолжительного термоокислительного старения при температуре 100 °С**

Продолжительность старения, ч	ИО _{ММ}	ИД _{СМ(10)}	ИД _{СМ(20)}	ИД _{СМ(30)}	ИД _{СЭ}
	ММ	ММ(90):СЭ(10)	ММ(80):СЭ(20)	ММ(70):СЭ(30)	СЭ
0	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000
120	0,041	0,020	0,017	0,009	0,000
424	0,107	0,061	0,051	0,028	0,001
630	0,167	0,091	0,079	0,037	0,002
960	0,274	0,131	0,119	0,062	0,003
1340	0,354	0,208	0,168	0,092	0,005
2000	0,417	0,284	0,238	0,135	0,007
R^2 (линейная регрессия)	0,954	0,996	0,996	0,999	0,999
Повышение стабильности к окислению масла, %	—	32	43	68	—

Таблица 2

**Индексы окисленности и деструкции изоляционных жидкостей
в процессе продолжительного термического старения при температуре 100 °С**

Продолжительность старения, ч	ИО _{ММ}	ИД _{СМ(10)}	ИД _{СМ(20)}	ИД _{СМ(30)}	ИД _{СЭ}
	ММ	ММ(90):СЭ(10)	ММ(80):СЭ(20)	ММ(70):СЭ(30)	СЭ
0	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000
64	0,031	0,015	0,013	0,007	0,000
348	0,053	0,027	0,023	0,013	0,001
546	0,063	0,032	0,028	0,016	0,001
816	0,078	0,047	0,040	0,022	0,001
1238	0,103	0,060	0,052	0,027	0,001
2000	0,123	0,084	0,070	0,040	0,002
R^2 (линейная регрессия)	0,972	0,978	0,977	0,976	0,979
Повышение стабильности к окислению масла, %	—	35	46	69	—

В табл. 1 и 2 приведены результаты расчета ИО_{ММ}, ИД_{СМ} и ИД_{СЭ} с использованием уравнений (1) и (2) для термически состаренных диэлектрических жидкостей в открытых и закрытых сосудах соответственно.

Увеличение значений индексов по мере старения изоляционных жидкостей свидетельствует о разрушении одних соединений и образовании других, по-разному влияющих на изоляционные свойства диэлектриков. Согласно полученным значениям индекса окисленности масла и индекса деструкции смесей, добавление синтетического эфира к трансформаторному маслу усиливает химическую стабильность последнего как в герметичных условиях старения (табл. 1), так и в открытых сосудах с доступом воздуха (табл. 2). Противоокислительные свойства масла ТКп возрастают в смеси с долей синтетического эфира 20 и 30 %. В этом случае срок службы жидкой изоляции, по сравнению с маслом, увеличится на 43 и 68 %, а в герметичных условиях на 46 и 69 %.

Таким образом, приведенные данные говорят о высокой информативности ИК-спектроскопии для изучения продуктов окисления и термического превращения в масле, смесях масла с синтетическим эфиром, а также самом эфире Midel 7131. Этот метод позволяет делать выводы о характере деструкции и дальнейшем изменении свойств изоляционных жидкостей. Стоит понимать, что ИК-спектрометрия относится к экспресс-методам, позволяющим получать результат в считанные минуты. В отличие от традиционных методов, в частности кислотно-основного титрования, для ИК-анализа требуется минимальный объем пробы изоляционной жидкости, безопасных реактивов, а значит, вопросы утилизации решаются довольно просто без ущерба для окружающей среды. Кроме того, ИК-спектроскопия имеет огромные перспективы внедрения в систему непрерывной диагностики состояния внутренней

изоляции высоковольтного оборудования посредством подключения оптоволоконных кабелей к оптическим спектрометрам (оптоволоконные спектрометры). В целом, применение ИК-спектроскопии среднего диапазона при анализе диэлектрических жидкостей (минеральные масла на основе нефти, сложноэфирные жидкости, а также смеси масла и эфира в различном соотношении) открывает широкие возможности для осуществления контроля их качества, определения степени окисленности и деструкции в процессе эксплуатации этих жидкостей в высоковольтном электрооборудовании. В свою очередь, контроль качества изоляционных материалов необходим для своевременного планирования и проведения нужных мероприятий по продлению ресурса изоляции силовых трансформаторов, измерительных трансформаторов, высоковольтных вводов и другого электрооборудования, где в качестве изоляции используются диэлектрические жидкости.

Заключение. С помощью ИК-спектроскопии впервые исследован структурно-групповой состав эфиромасляных смесей до и после их продолжительного старения в разных условиях. Выявлено, что по мере добавления синтетического эфира в масло на ИК-спектре смеси фиксируется увеличение интенсивности полос поглощения, обусловленное валентными колебаниями связей $\text{CO}-\text{C}$, $\text{C}-\text{O}$, $\text{C}-\text{O}-\text{C}$, $\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{C}$. Особенно заметно изменяется интенсивность пика 1161 см^{-1} ($\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{C}$), характерного для сложных эфиров. Установлено, что в ходе окисления эфиромасляных смесей интенсивность характеристических полос карбонильной группы $\text{C}=\text{O}$ (1747 см^{-1}) и сложноэфирной группы $\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{C}$ (1161 см^{-1}) уменьшается, в то время как интенсивность поглощения в области частот CH -группы (2920 см^{-1}) остается практически неизменной.

Для оценки степени разложения смесей масла и сложноэфирной диэлектрической жидкости предложено понятие индекса деструкции, который рассчитывается по формуле, учитывающей изменение значений оптической плотности на полосе групп $\text{C}=\text{O}$ и $\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{C}$. Данный показатель позволяет количественно оценить состояние альтернативных сложноэфирных диэлектрических жидкостей, а также эфиромасляных смесей в процессе их эксплуатации в высоковольтном оборудовании, где они будут подвергаться постепенному окислению и разложению, соприкасаясь с кислородом воздуха, с металлическими деталями, нагретыми частями оборудования, обмоток.

Согласно полученным значениям индекса деструкции смесей, добавление синтетического эфира к трансформаторному маслу усиливает химическую стабильность последнего как в герметичных, так и в негерметичных условиях старения. Наибольшее улучшение противомокислительных свойств масла ТКп происходит в смеси с долей синтетического эфира 20 и 30 %. В этом случае срок службы жидкой изоляции, по сравнению с самим маслом, увеличивается на 43 и 68 %, а в герметичных условиях — на 46 и 69 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бордин А. В., Климов А. А., Никодимов С. И., Шакмаев А. А. Ингибиторы окисления в изоляционных маслах. Определение методом инфракрасной Фурье-спектроскопии // Лаборатория и производство. 2019. № 4(8). С. 102—110.
2. Гарифуллин М. Ш. Использование методов оптической спектроскопии для диагностики минеральных изоляционных масел // Фундаментальные исследования. 2013. № 10—15. С. 3299—3304.
3. Гарифуллин М. Ш. Метод и аппаратура спектрального экспресс-анализа концентрации ионола и кислотного числа в изоляционных маслах: Дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2001. 148 с.
4. Гарифуллин М. Ш. Контроль технического состояния маслonaполненного трансформаторного электрооборудования методами оптической спектроскопии: Дис. ... докт. техн. наук. Казань, 2014. 290 с.
5. Валиуллина Д. М., Гарифуллин М. Ш., Козлов В. К. Зависимость спектров пропускания изоляционных масел от их кислотного числа // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2003. № 3-4. С. 175—178.

6. Валиуллина Д. М. Спектроскопические методы измерения и контроля кислотного числа изоляционных масел в видимом и ультрафиолетовом диапазоне спектра: Дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2003. 146 с.
7. Туранов А. Н. Новые методы диагностики и изучения механизмов деградации трансформаторных масел: Дис. ... докт. техн. наук. Казань, 2021. 220 с.
8. Wanga K., Wanga F., Lia J., Huanga Z., Loua Z., Hana O., Zhaoa Q., Hua K. Synthesis of trimethylolpropane fatty acid triester as a high performance electrical insulating oil // *Industrial Crops & Products*. 2019. N 142. Art. no. 111834.
9. Hosier I. L., Vaughan A. S., Swingler S. G. Studies on the ageing behavior of various synthetic and natural insulation oils // *ICDL 2008. IEEE Intern. Conf. on Dielectric Liquids*, 2008. DOI:10.1109/ICDL.2008.4622471.
10. Bondioli P., Sabarino G. P. The identification and evaluation of natural and synthetic esters in mineral oil // *Tribolest journal*. 1999. Vol. 125, N 6. P. 125—137.
11. Mohan Rao U., Sood Y. R., Jarial R. K. Physiometric and FTIR analysis of cellulose insulation in blend of mineral and synthetic ester oils for transformers // *IET Science, Measurement & Technology*. 2017. Vol. 11, N 3. P. 297—304.
12. Lyutikova M., Korobeinikov S., Mohan Rao U., Fofana I. Mixed Insulating Liquids with Mineral Oil for High Voltage Transformer Applications: A Review // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2022. Vol. 29, N 2. P. 454—461.
13. Lyutikova M., Korobeinikov S., Konovalov A. Evaluation of the Properties of Mixture of Aromatic Mineral Oil and Synthetic Ester for High-Voltage Equipment // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2021. Vol. 28, N 4. P. 1282—1290.
14. Лютикова М. Н., Коробейников С. М., Коновалов А. А. Электрофизические свойства смесей минерального масла и синтетической сложноэфирной диэлектрической жидкости // *Надежность и безопасность энергетики*. 2021. Т. 14, № 2. С. 132—141.
15. Лютикова М. Н., Коробейников С. М., Сотников С. И., Коновалов А. А. Изучение химических свойств изоляционных смесей в целях применения их в высоковольтном оборудовании // *Надежность и безопасность энергетики*. 2022. Т. 15, № 2. С. 81—89.
16. Lyutikova M., Konovalov A., Korobeinikov S. Changing of the insulating characteristics of mixtures (mineral oil and synthetic ester) during prolonged exposure of elevated temperature // 49th session CIGRE. 2022. Art. no. D1-10607.

Сведения об авторах

- Марина Николаевна Лютикова** — канд. хим. наук, доцент; Новосибирский государственный технический университет, кафедра безопасности труда; E-mail: m.lyutikova@mail.ru
- Сергей Миронович Коробейников** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Новосибирский государственный технический университет, кафедра безопасности труда; заведующий кафедрой; E-mail: korobeinikov@corp.nstu.ru
- Александр Викторович Ридель** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, кафедра безопасности труда; E-mail: ridel@corp.nstu.ru

Поступила в редакцию 21.04.23; одобрена после рецензирования 21.05.23; принята к публикации 28.08.23.

REFERENCES

1. Bordin A.V., Klimov A.A., Nikodimov S.I., Shakmaev A.A. *Laboratory and production*, 2019, no. 4(8), pp. 102–110. (in Russ.)
2. Garifullin M.Sh. *Basic Research*, 2013, no. 10-15, pp. 3299–3304. (in Russ.)
3. Garifullin M.Sh. *Metod i apparatura spektral'nogo ekspres-analiza kontsentratsii ionola i kislotnogo chisla v izolyatsionnykh maslakh* (Method and Equipment for Spectral Express Analysis of Ionol Concentration and Acid Number in Insulating Oils), Candidate's thesis, Kazan, 148 p. (in Russ.)
4. Garifullin M.Sh. *Kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya maslonapolnennogo transformatornogo elektrooborudovaniya metodami opticheskoy spektroskopii* (Monitoring the Technical Condition of Oil-Filled Transformer Electrical Equipment Using Optical Spectroscopy), Doctor's thesis, Kazan, 2014, 290 p. (in Russ.)
5. Valiullina D.M., Garifullin M.Sh., Kozlov V.K. *News of higher educational institutions. Energy problems*, 2003, no. 3-4, pp. 175–178. (in Russ.)
6. Valiullina D.M. *Spektroskopicheskiye metody izmereniya i kontrolya kislotnogo chisla izolyatsionnykh masel v*

- vidimom i ul'trafiioletovom diapazone spektra* (Spectroscopic Methods for Measuring and Monitoring the Acid Number of Insulating Oils in the Visible and Ultraviolet Range of the Spectrum), Candidate's thesis Kazan, 2003, 146 p. (in Russ.)
7. Turanov A.N. *Novyye metody diagnostiki i izucheniya mekhanizmov degradatsii transformatornykh masel* (New Methods for Diagnosing and Studying the Mechanisms of Degradation of Transformer Oils), Doctor's thesis Kazan, 2021, 220 p. (in Russ.)
 8. Wanga K., Wanga F., Lia J., Huang Z., Loua Z., Hana O., Zhao Q., Hua K. *Industrial Crops & Products*, 2019, no. 142, art. no. 111834.
 9. Hosier I.L., Vaughan A.S., Swingler S.G. *ICDL 2008. IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, 2008, DOI:10.1109/ICDL.2008.4622471.
 10. Bondioli P., Sabarino G.P. *Tribolest journal*, 1999, no. 6(125), pp. 125–137.
 11. Mohan Rao U., Sood Y.R., Jarial R.K. *IET Science, Measurement & Technology*, 2017, no. 3(11), pp. 297–304.
 12. Lyutikova M., Korobeinikov S., Mohan Rao U., Fofana I. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2022, no. 2(29), pp. 454–461.
 13. Lyutikova M., Korobeinikov S., Konovalov A. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2021, no. 4(28), pp. 1282–1290.
 14. Lyutikova M.N., Korobeynikov S.M., Konovalov A.A. *Safety and Reliability of Power Industry*, 2021, no. 2(14), pp. 132–141. (in Russ.)
 15. Lyutikova M.N., Korobeynikov S.M., Sotnikov S.I., Konovalov A.A. *Safety and Reliability of Power Industry*, 2022, no. 2(15), pp. 81–89. (in Russ.)
 16. Lyutikova M., Konovalov A., Korobeynikov S. *49th session CIGRE*, 2022, art. no. D1-10607.

Data on authors

- | | |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Marina N. Lyutikova | — PhD, Associate Professor; Novosibirsk State Technical University, Department of Labor Safety; E-mail: m.lyutikova@mail.ru |
| Sergey M. Korobeynikov | — Dr. Sci., Professor; Novosibirsk State Technical University, Department of Labor Safety; Head of the Department; E-mail: korobeynikov@corp.nstu.ru |
| Alexander V. Ridel | — PhD, Senior Researcher; Novosibirsk State Technical University, Department of Labor Safety; E-mail: ridel@corp.nstu.ru |

Received 21.04.23; approved after reviewing 21.05.23; accepted for publication 28.08.23.

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ КОНТРОЛЬНОЙ ФИКСАЦИИ
НАПОЛНИТЕЛЯ К ШЛИФУ ЗУБА СТОМАТОЛОГИЧЕСКИМ ЦЕМЕНТОМЛ. И. ШАЛАМАЙ¹, Е. Е. МАЙОРОВ^{2*}, Е. Ю. МЕНДОСА³,
В. Б. ЛАПМУСОВА¹, Н. С. ОКСАС¹¹ *Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова,
Санкт-Петербург, Россия*² *Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия
*majorov_ee@mail.ru*³ *Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова,
Москва, Россия*

Аннотация. Проведено исследование, направленное на получение спектральных данных о проникновении адгезива химического отверждения „Tokuyama Universal Bond II“ в дентин при использовании разных методик. Представлен внешний вид спектрофотометра, дана оптическая схема и приведены технические характеристики прибора. Приведены образцы для исследований, изготовленные по разным методикам. Получены спектральные зависимости коэффициента поглощения в зоне фиксации композитных вкладок с дентином и приграничных областей образцов-шлифов при применении адгезива „Tokuyama Universal Bond II“ по протоколу, описанному в инструкции; при нанесении „Tokuyama Universal Bond II“ с дополнительной 10-секундной экспозицией на дентине до начала раздувания; при 10-секундном втирании „Tokuyama Universal Bond II“ в поверхность дентина.

Ключевые слова: спектрофотометр, образец контрольной фиксации, коэффициент поглощения, кварцевая кювета, длина волны излучения, композитная вкладка, адгезив химического отверждения

Ссылка для цитирования: Шаламай Л. И., Майоров Е. Е., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Спектрофотометрическое исследование образцов контрольной фиксации наполнителя к шлифу зуба стоматологическим цементом // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 10. С. 887—894. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-887-894.

USING A SPECTROPHOTOMETER IN A STUDY OF SAMPLES TO CHECK CONTROL FIXATION
OF THE FILLER TO THE TOOTH SECTION WITH DENTAL CEMENTL. I. Shalamay¹, E. E. Maiorov^{2*}, E. Yu. Mendosa³,
V. B. Lampusova¹, N. S. Oksas¹¹ *Pavlov University, St. Petersburg, Russia*² *St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia
majorov_ee@mail.ru*³ *A. I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry,
Moscow, Russia*

Abstract. A study is conducted to obtain spectral data on the penetration of the chemically cured adhesive “Tokuyama Universal Bond II” into dentin using various techniques. An external view of the used spectrophotometer is shown, an optical diagram of the instrument is presented, and the technical characteristics of the device are formulated. Samples for research, prepared using various methods, are depicted. The spectral dependences of the absorption coefficient are obtained in the zone of the boundaries of fixation of composite inlays with dentin and the border areas of the specimen-sections when using the Tokuyama Universal Bond II adhesive according to the protocol described in the manufacturer's instructions: when applying “Tokuyama Universal Bond II” with an additional 10-second exposure on the dentin before swelling begins; by rubbing “Tokuyama Universal Bond II” into the dentin surface for 10 seconds.

Keywords: spectrophotometer, control fixation sample, absorption coefficient, quartz cuvette, radiation wavelength, composite tab, chemical curing adhesive

For citation: Shalamay L. I., Maiorov E. E., Mendosa E. Yu., Lampusova V. B., Oksas N. S. Using a spectrophotometer in a study of samples to check control fixation of the filler to the tooth section with dental cement. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 10. P. 887—894 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-887-894.

Введение. В терапевтической стоматологии за последние двадцать лет произошло много кардинальных изменений: теперь стоматологи повсеместно используют современные адгезивные технологии, композитные реставрационные материалы и фотополимеризаторы [1]. На сегодняшний день врачи выполняют восстановление твердых тканей зубов с морфологической точностью, воспроизведением индивидуальных оптических характеристик и подбором цветовой гаммы [2]. На отечественном рынке стоматологических материалов постоянно появляются новые адгезивы, цементы, а также эстетические композиты для прямой и непрямой реставрации [3]. Воссозданная форма и правильно подобранный цвет не всегда могут дать полную гарантию высокой эстетики реставрации. В отдаленных клинических результатах важны такие характеристики реставрационных материалов, как прочность, устойчивость к функциональным нагрузкам, полируемость, герметичность [4]. Реставрационные композиты по физико-химическим и оптическим свойствам во многом приближены к твердым тканям зуба, но все-таки отличаются от них [5, 6]. Это можно отметить при визуальном сравнении пломб с твердыми тканями зубов. В полости рта, при постоянном изменении температурного режима, условий освещения, жевательной нагрузки и пр. [7, 8] могут изменяться не только реставрация, но и ее краевое прилегание, может возникать механическая и гидролитическая деградация адгезивного соединения [9, 10]. Таким образом, для качественного восстановления твердых тканей зубов одинаково важен как выбор реставрационного композита, так и бондингового агента [11]. Для того чтобы добиться наилучшего клинического результата, необходимо детально исследовать как новейшие композиты, так и адгезивные системы, это особенно важно, когда характеристики новых стоматологических материалов значительно отличаются от параметров предшественников.

В настоящее время существует множество методов и средств оценки и контроля свойств материалов. В сферу стоматологии все больше внедряются современные оптические и оптико-электронные приборы и комплексы, которые позволяют доказательно сравнивать оптические характеристики, верифицировать материалы (исключать подделки), оценивать краевое прилегание и фиксацию к тканям зуба [12, 13]. Среди всего многообразия методов и средств огромное внимание уделяется спектральным приборам [14, 15]. Эти приборы позволяют получить достоверную, наглядную и точную информацию о структуре и составе исследуемого вещества по спектру поглощения. Спектрометры дают возможность как качественно, так и количественно интерпретировать результаты измерений [16, 17].

Для клинической стоматологии важным является вопрос о проникновении стоматологических адгезивов в дентин зуба. От глубины проникновения во многом зависит сцепление бонда с дентином, а значит, и герметичность и краевое прилегание реставраций к твердым тканям зуба.

Поэтому представляет интерес изучение оптических свойств места соединения стоматологического адгезива и композитного цемента с твердыми тканями зуба с помощью спектрофотометра.

Цель настоящей работы: выяснить, имеет ли значение техника нанесения на дентин универсального стоматологического химического адгезива „Tokuyama Universal Bond II“, исследовать спектрофотометром образцы контрольной фиксации композитных вкладок к дентину адгезивом „Tokuyama Universal Bond II“ и композитным цементом „Estecem II Plus“.

В работе поставлена задача с помощью автоматизированного спектрофотометра „u-Violet VIS“ компании „ЛабКонцепт“ получить спектральные зависимости коэффициента

поглощения от длины волны излучения на стыке стоматологических материалов и дентина, проанализировать полученные экспериментальные результаты и определить по составу прилегающих областей глубину проникновения внешних агентов в дентин.

Метод и объект исследования. В качестве объектов исследования использовались современные стоматологические материалы для восстановительных работ на твердых тканях зуба фирмы „Tokuyama Dental“ (Япония): „Tokuyama Universal Bond II“ и „Estecem II Plus“.

„Tokuyama Universal Bond II“ — двухкомпонентная, самополимеризующаяся адгезивная система для фиксации прямых и непрямых реставраций по протоколу тотального протравливания, избирательного протравливания эмали или самопротравливания. Универсальный адгезив „Tokuyama Universal Bond II“ совместим с композитными материалами химической (самополимеризующимися), световой и двойной полимеризации. Этот материал повышает прочность адгезии полимеризуемых композитных материалов (адгезивный композитный цемент, акриловая пластмасса, композитная смола) к материалам непрямых реставраций: стеклокерамика, оксидная керамика (оксид циркония или алюминия), металлы (благородные и неблагородные), композиты с неорганическим наполнителем. Он содержит мономеры фосфорной кислоты, бисфенол-А-ди(2-гидроксипропоксид) диметакрилат (Bis-GMA), триэтиленгликоль диметакрилат (TEGDMA), 2-гидроксиэтил метакрилат (HEMA), MTU-6 (тиоурацил мономер), силанизирующий агент, пероксид, боратовый катализатор, ацетон, этанол, очищенную воду.

„Estecem II Plus“ — рентгеноконтрастный композитный цемент двойной полимеризации (световая и/или химическая). Удобен в работе, обладает превосходными эстетическими характеристиками, обеспечивает адгезию к тканям зуба и всем реставрационным материалам. Врачами-стоматологами отмечаются высокая прочность адгезии при химической полимеризации и качественная адгезия к кремнийсодержащей керамике. Это возможно благодаря двухкомпонентной системе подготовки тканей зуба и поверхности реставрации. Этот цемент не содержит кислые мономеры, которые могут стать причиной окрашивания и, как следствие, неэстетичного внешнего вида реставрации. Прочность после полимеризации и устойчивость к окрашиванию являются важными преимуществами материала.

Исследуемые материалы были предоставлены ООО „Центр имплантации и комплексного лечения“ (Санкт-Петербург).

Для исследований использовался автоматизированный спектрофотометр „u-Violet VIS“, внешний вид которого приведен на рис. 1.



Рис. 1

Построенный по однолучевой схеме спектрофотометр предназначен для измерений в диапазоне длин волн 320—1100 нм. Он активно используется в научных и учебных лаборато-

риях, пригоден для решения различного рода задач в химической, пищевой, оптической промышленности. Спектрофотометр имеет несколько режимов измерения: спектральный, фотометрический, кинетический и количественный анализ. В приборе предусмотрен аварийный режим работы: когда отключается питание, полученные результаты сохраняются во внутренней памяти. Спектрофотометр комплектуется держателями четырех кювет с длиной оптического пути 5—50 мм и одной кюветы с длиной оптического пути 100 мм.

На рис. 2 приведена оптическая схема „u-Violet VIS“: 1 — вольфрамовая галогеновая лампа; 2 — собирающее зеркало; 3—8 — фильтры; 9 — защитная пленка; 10, 14 — щели; 11 — дифракционная решетка; 12, 13 — направляющие зеркала; 15, 17 — собирающие линзы; 16 — кюветное отделение; 18 — фотоэлектронный умножитель.

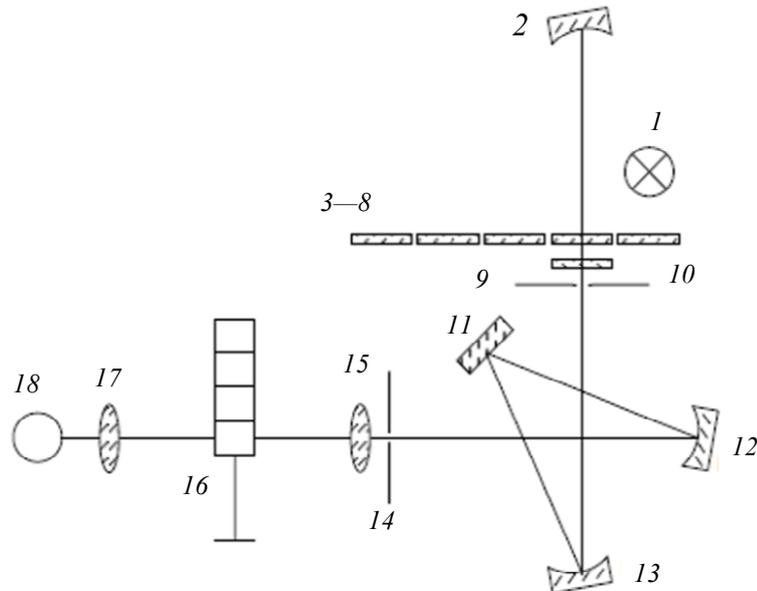


Рис. 2

Технические характеристики спектрофотометра „u-Violet VIS“ приведены ниже:

Оптическая схема.....	Однолучевая
Источник излучения.....	Вольфрамовая галогенная лампа
.....	ФЭУ
Детектор.....	320—1100 нм
Спектральный диапазон	2 нм
Ширина щели	± 0,5 нм
Погрешность установки длины волны	−0,3—3,0 Abs
Фотометрический диапазон	≤ 0,05 %
Уровень рассеянного излучения (220 нм NaI, 360 нм NaNO ₂).....	± 0,002 Abs (0—0,5 Abs)
Фотометрическая точность	± 0,004 Abs (0,5—1 Abs)
.....	± 0,5 % (0—100 %)
Фотометрическая воспроизводимость	≤ 0,2 %
Размеры.....	53×41×21 см
Вес	18 кг

Экспериментальные результаты. Образцы для исследований (рис. 3) состояли из двух одинаковых вкладок 1 и 2, изготовленных из композитного материала, между которыми находился дентин, который фиксировался к ним посредством стоматологического клея „Токуяама Universal Bond II“ и цемента „Estecem II Plus“. Согласно инструкции нанесения и фиксации к дентину, методика была следующей: со стороны 1 (рис. 3, а) наносили на поверхность дентина клей и раздували воздухом. Затем приклеивали композитную вкладку к дентину посредством цемента. Метод 10-секундной экспозиции применялся со стороны 2: на по-

верхность дентина наносили клей и через 10 с раздували воздухом, после чего фиксировали композитную вкладку к дентину цементом. На втором образце (рис. 3, б) сторона 1 была обработана, как и у первого образца, а на стороне 2 был применен метод втирания, т.е. нанесенный на поверхность дентина клей втирали в течение 10 с, затем раздували воздухом и далее крепили композитную вкладку к дентину стоматологическим цементом.

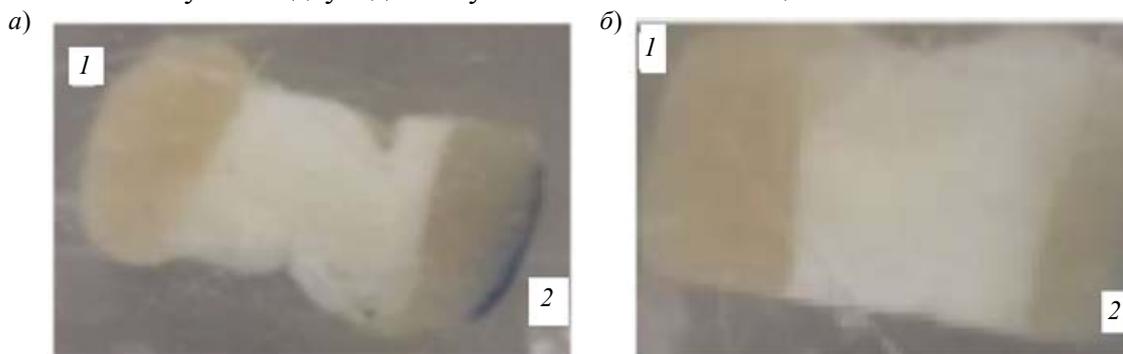


Рис. 3

Данные образцы были зафиксированы в кварцевой кювете перпендикулярно основанию кюветы. Во время измерений кювета с образцом перемещалась на определенную высоту посредством специального микрометрического устройства, чтобы световой луч просканировал нужные границы и пограничные области. На рис. 4 показан канал измерений, в котором производился контроль образцов.



Рис. 4

В результате экспериментальных исследований получены зависимости коэффициента поглощения дентина K от глубины проникновения адгезива h (рис. 5; 1 — 10-секундная экспозиция, 2 — 10-секундное активное втирание адгезива).

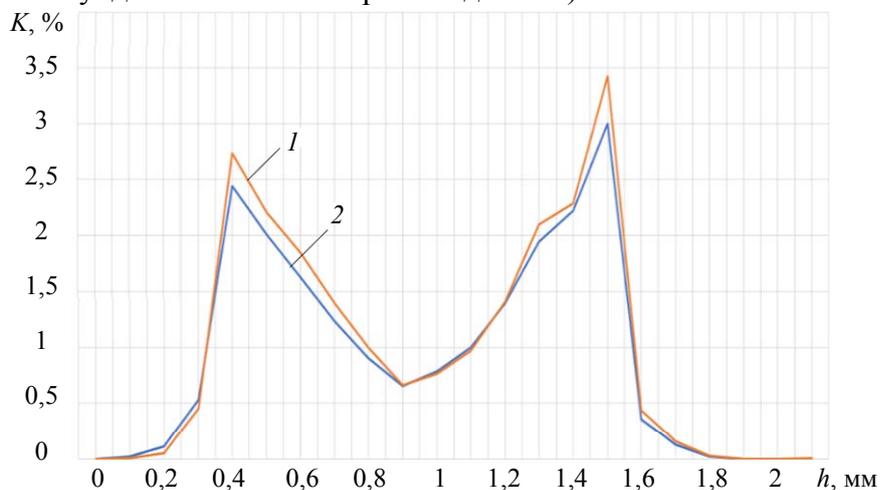


Рис. 5

Графические зависимости показывают, что в различных образцах, полученных с применением базовой и модифицированных методик нанесения адгезива, кривые практически не различаются по форме, есть лишь незначительные различия в высоте зубцов. Восходящие кривые на участке 0,1—0,2 мм демонстрируют поглощение композитной вкладкой, участок 0,2—0,3 мм соответствует диапазону коэффициентов поглощения композитным цементом, интервал 0,3—0,4 мм соответствует адгезивному слою и глубине проникновения стоматологического адгезива при применении его по инструкции (контроль). Максимум поглощения бонда регистрируется на отметке 0,4 мм, далее виден явно выраженный спектр дентина зуба без проникновения в него адгезива 0,4—1,5 мм. Нисходящие кривые от 1,5 до 1,6 мм дают информацию о глубине гибридного и адгезивного слоев адгезива при применении модифицированных методик. Отрезок 1,6—1,7 мм фиксирует поглощение композитного цемента, 1,7—1,8 мм — поглощение композитной вкладки. Проанализировав спектральные зависимости, можно сделать вывод, что все представленные методики одинаково эффективны, дополнительная экспозиция или активное втирание бонда не привели к увеличению глубины проникновения, поэтому в клинической практике врачу-стоматологу достаточно действовать по алгоритму, рекомендованному в инструкции производителя.

Заключение. В работе получены спектральные зависимости коэффициента поглощения на стыке образцов, представленных композитом вкладки, цементом для фиксации и адгезивом (при нанесении адгезива согласно трем различным методикам). Для каждой методики выявлены параметры глубины проникновения универсального бонда химического отверждения в дентин. Данное исследование показало, что „Tokuyama Universal Bond II“ (при применении его по инструкции производителя) обладает высокой способностью образования гибридного слоя с дентином, дополнительная экспозиция 10 с на поверхности дентина или активное втирание в дентин в течение 10 с адгезива „Tokuyama Universal Bond II“ не дают значимых изменений по глубине его проникновения. Результаты настоящей работы могут представлять интерес для медицины, в частности, терапевтической и ортопедической стоматологии, а также для оптического приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Князева М. А. Виды стоматологических фотополимеризационных устройств и их сравнительная характеристика // Вестн. ВГМУ. 2011. Т. 10, № 4. С. 138—147.
2. Maiorov E. E., Prokopenko V. T., Ushveridze L. A. A system for the coherent processing of specklegrams for dental tissue surface examination // Biomedical Engineering. 2014. Vol. 47, N 6. P. 304—306. DOI: 10.1007/s10527-014-9397-2.
3. Maiorov E. E., Shalamay L. I., Dagaev A. V., Kirik D. I., Khokhlova M. V. An interferometric device for detecting subgingival caries // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53. P. 258—261. DOI: 10.1007/s10527-019-09921-0.
4. Кузьмина Д. А., Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Нарушак Н. С. Использование метода спектроскопии отражения для распознавания подлинности стоматологических реставрационных материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 1. С. 63—70. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-63-70.
5. Кузьмина Д. А., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е., Нарушак Н. С., Сакерина А. И., Шаламай Л. И. Экспериментальные исследования оптических свойств твердых тканей передних зубов и современных синтетических пломбирочных материалов // Стоматология для всех. 2020. № 4. С. 58—62. DOI.org/10.35556/idr-2020-4(93)58-62.
6. Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Кузьмина Д. А., Мендоса Е. Ю., Нарушак Н. С., Сакерина А. И. Спектральный анализ стоматологического реставрационного материала и зубной ткани пациентов разных возрастных групп in vitro // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2020. № 8. С. 105—114.
7. Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Кузьмина Д. А., Майоров Е. Е. Исследование оптических свойств композитных материалов и твердых тканей зуба пациентов in vitro // Dental Forum. 2021. № 1. С. 3—6.

8. Кузьмина Д. А., Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е., Нарушак Н. С. Флуоресцентная спектроскопия для анализа пломбировочных материалов и твердых тканей зубов *in vitro* // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 7. С. 576—582. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-576-582.
9. Черняк Т. А., Бородинский Ю. М., Петрова Е. А., Майоров Е. Е., Попова Е. В., Хохлова М. В. Применение автоматизированного оптико-механического устройства для томографического исследования десны под воздействием внешних агентов // Научное приборостроение. 2021. Т. 31, № 3. С. 16—24.
10. Майоров Е. Е., Курлов В. В., Дагаев А. В., Таюрская И. С., Громов О. В., Гулиев Р. Б. Применение спектроколориметрической системы для исследований реставрационных стоматологических материалов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 12. С. 6-10. DOI: 10.25791/pribor.12.2021.1307.
11. Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Спектральные методы и средства исследований оптических свойств стоматологического материала на основе метилметакрилатных смол // Медицинская техника. 2021. № 6. С. 24—27.
12. Шаламай Л. И., Оксас Н. С., Лампусова В. Б., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е. Экспериментальные исследования спектров оптического поглощения и пропускания стоматологического реставрационного материала разной толщины // Dental Forum. 2022. № 1. С. 22—26.
13. Шаламай Л. И., Майоров Е. Е., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Определение рабочей толщины слоя современного стоматологического блокера методом спектроскопии // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 167—172. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-167-172.
14. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
15. Котов И. Р., Майоров Е. Е., Хопов В. В. Интерферометрические исследования биологических объектов // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2004. № 15. С. 70—72.
16. Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Получение спектральных зависимостей коэффициента пропускания композитного материала, блокирующего влияние темноты полости рта при реставрации сквозных дефектов коронковой части передних зубов // Стоматология для всех. 2022. № 1(98). С. 52—57. DOI: 10.35556/idr2022-1(98)52-57.
17. Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Применение метода молекулярной спектроскопии для количественного анализа твердофазных стоматологических образцов // MEDICUS. 2022. № 2(44). С. 54—60.

Сведения об авторах

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

Поступила в редакцию 05.04.23; одобрена после рецензирования 19.04.23; принята к публикации 28.08.23.

REFERENCES

1. Knyazeva M.A. *Vestnik Vitebskogo Gosudarstvennogo Meditsinskogo Universiteta*, 2011, no. 4(10), pp. 138–147. (in Russ.)
2. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. *Biomedical Engineering*. 2014, no. 6(47), pp. 304–306, DOI: 10.1007/s10527-014-9397-2
3. Maiorov E.E., Shalamay L.I., Dagaev A.V., Kirik D.I., Khokhlova M.V. *Biomedical Engineering*, 2019, vol. 53, pp. 258–261, DOI: 10.1007/s10527-019-09921-0.
4. Kuzmina D.A., Maiorov E.E., Shalamay L.I., Mendosa E.Yu., Narushak N.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 1(64), pp. 63–70, DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-63-70 (in Russ.)
5. Kuzmina D.A., Mendoza E.Yu., Maiorov E.E., Narushak N.S., Sakerina A.I., Shalamai L.I. *Dentistry for everyone*, 2020, no. 4, pp. 58–62, DOI.org/10.35556/idr-2020-4(93)58-62. (in Russ.)
6. Maiorov E.E., Shalamay L.I., Kuzmina D.A., Mendosa E.Yu., Narushak N.S., Sakerina A.I. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2020, no. 8, pp. 105–114. (in Russ.)
7. Shalamay L.I., Mendosa E.Yu., Kuzmina D.A., Maiorov E.E. *Dental Forum*, 2021, no. 1, pp. 3–6. (in Russ.)
8. Kuzmina D.A., Shalamay L.I., Mendosa E.Yu., Maiorov E.E., Narushak N.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 7(64), pp. 576–582, DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-576-582 (in Russ.)
9. Chernyak T.A., Borodyansky Y.M., Petrova E.A., Maiorov E.E., Popova E.V., Khokhlova M.V. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation), 2021, no. 3(31), pp. 16–24. (in Russ.)
10. Maiorov E.E., Kurlov V.V., Dagaev A.V., Tayurskaya I.S., Gromov O.V., Guliyev R.B. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2021, no. 12, pp. 6–10, DOI: 10.25791/pribor.12.2021.1307. (in Russ.)
11. Maiorov E.E., Shalamai L.I., Mendosa E.Y., Lampusova V.B., Oksas N.S. *Biomedical Engineering*, 2021, no. 6, pp. 24–27 (in Russ.)
12. Shalamay L.I., Oksas N.S., Lampusova V.B., Mendosa E.Yu., Maiorov E.E. *Dental Forum*, 2022, no. 1, pp. 22–26. (in Russ.)
13. Shalamay L.I., Maiorov E.E., Mendosa E.Yu., Lampusova V.B., Oksas N.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 2(65), pp. 167–172, DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-167-172. (in Russ.)
14. Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryayev D.T. *Opticheskiye izmereniya* (Optical Measurements), Moscow, 1987, 264 p. (in Russ.)
15. Kotov I.R., Mayorov E.E., Khopov V.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2004, no. 15, pp. 70–72. (in Russ.)
16. Shalamay L. I. Mendoza E. Yu., Maiorov E. E., Lampusova V. B., Oksas N. S. *Dentistry for everyone*, 2022, no. 1(98), pp. 52–57, DOI: 10.35556/idr2022-1(98)52-57. (in Russ.)
17. Shalamay L.I., Mendosa E.Yu., Maiorov E.E., Lampusova V.B., Oksas N.S. *MEDICUS*, 2022, no. 2(44), pp. 54–60. (in Russ.)

Data on authors

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

Received 05.04.23; approved after reviewing 19.04.23; accepted for publication 28.08.23.