

ISSN 2500—0381
Электронная версия

ISSN 0021—3454
Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

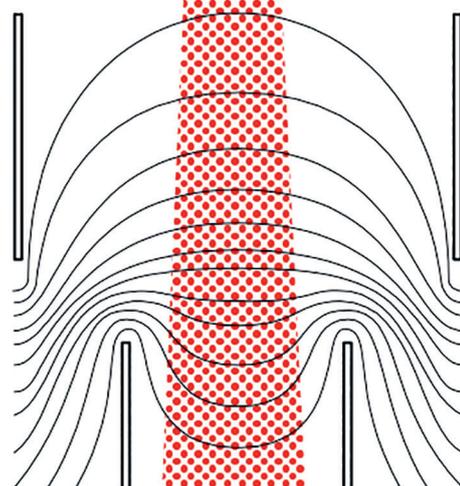
П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ **5**

Т. 67
2024



Journal of Instrument **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-Петербурга, 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 И. М. Игошина

Набор, верстка: Е. С. Егорова

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 03.06.2024 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;
- методы и приборы для анализа и контроля материалов, изделий, веществ и природной среды;
- приборы, системы и изделия медицинского назначения;
- проектирование и технология производства приборов;
- 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: каждый на отдельном листе формата А4 (не заверстывать в текст), таблицы.

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

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

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

Формулы и отдельные символы набираются с использованием только 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

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Ким С. А., Пыркин А. А., Борисов О. И. Алгоритм согласованного траекторного управления движением квадрокоптера 385

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

- Есиков О. В., Есиков Д. О., Данилов А. В., Земляничин М. С. Способ построения маршрута движения летательного аппарата с учетом рельефа местности на основе комплексного применения многоагентных алгоритмов 395

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

- Кочурова Д. Н., Калугин А. И., Антонов Е. А., Альес М. Ю. Моделирование прохождения лазерного сигнала через локальные неоднородности среды 406
- Нестеркина Н. П., Коваленко О. Ю., Железникова О. Е., Колтаева О. А., Журавлева Ю. А. Исследование спектральных характеристик светодиодных ламп-ретрофитов в течение срока службы 417

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

- Кашаев Р. С., Нгуен Д. А., Козелков О. В. Проточный экспресс-анализатор протонного магнитного резонанса в составе промышленного интернета вещей 425

МЕТРОЛОГИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

- Алексеев И. В., Замятин Д. С. Стенд КСД-2 для метрологического обеспечения лазерных и оптических измерителей скорости и длины 435
- Терещенко В. Г. Проблема идентификации физической величины по ее размерности 445

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Алешкин А. П., Соломянный И. В. Алгоритм синхронизации временных шкал пространственно разнесенных стандартов с использованием мобильных радиотелескопов 455
- Медунецкий В. М., Солк С. В., Шевцов В. С. Применение сплава Вуда для изготовления оптических зеркал 459

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. Lebetzkaya

Editor Irina M. Igoshina

Page-proof, makeup Ekaterina S. Egorova

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. 67

MAY 2024

№ 5

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL, AND INFORMATION PROCESSING

- Kim S. A., Pyrkin A. A., Borisov O. I.** Algorithm for Coordinated Trajectory Control of Quadcopter Motion 385

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

- Yesikov O. V., Yesikov D. O., Danilov A. V., Zemlyanitsyn M. S.** Method for Constructing an Aircraft Route Taking into Account the Terrain Based on the Integrated Use of Multi-Agent Algorithms 395

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Kochurova D. N., Kalugin A. I., Antonov E. A., Alies M. Yu.** Modeling of Laser Signal Propagation Through Local Inhomogeneities of the Medium 406
- Nesterkina N. P., Kovalenko O. Yu., Zheleznikova O. E., Koltaeva O. A., Zhuravleva Yu. A.** Study of Spectral Characteristics of LED Retrofit Lamps During the Service Life 417

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

- Kashaev R. S., Nguyen D. A., Kozelkov O. V.** Flow-Through Express Analyzer of Proton Magnetic Resonance as Part of the Industrial Internet of Things 425

METROLOGY AND METROLOGICAL SUPPORT

- Alekseev I. V., Zamyatin D. S.** Stand KSD-2 for Metrological Support of Laser and Optical Speed and Length Meters 435
- Tereshchenko V. G.** The Problem of Identifying a Physical Quantity by its Dimension 445

BRIEF NOTES

- Aleshkin A. P., Solomyanny I. V.** Algorithm for Synchronizing Time Scales of Spatially Separated Standards Using Mobile Radio Telescopes 455
- Medunetsky V. M., Solk S. V., Shevtsov V. S.** Application of Wood's Alloy for Optical Mirrors Manufacturing 459

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

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ,
УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**
SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

УДК 681.5
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-385-394

**АЛГОРИТМ СОГЛАСОВАННОГО ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ДВИЖЕНИЕМ КВАДРОКОПТЕРА**

С. А. Ким*, А. А. Пыркин, О. И. Борисов

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

Аннотация. Представлена полная модель движения квадрокоптера вдоль гладкой пространственной траектории. На основе модели предложен робастный алгоритм управления квадрокоптером по измерениям линейных координат и угла рысканья. С использованием дополнительных интеграторов получен динамический алгоритм управления с упрощенной методикой настройки регулятора.

Ключевые слова: управление движением квадрокоптера, траекторное управление, согласованное управление, робастное управление по выходу, геометрический подход

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, паспорт госзадания № 2019-0898.

Ссылка для цитирования: Ким С. А., Пыркин А. А., Борисов О. И. Алгоритм согласованного траекторного управления движением квадрокоптера // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 5. С. 385–394. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-385-394.

ALGORITHM FOR COORDINATED TRAJECTORY CONTROL OF QUADCOPTER MOTION

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

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

Abstract. A complete model of the motion of a quadcopter along a smooth spatial trajectory is presented. Using the model, a robust algorithm for controlling a quadcopter based on measurements of linear coordinates and yaw angle is proposed. Using additional integrators, a dynamic control algorithm with a simplified controller tuning technique is designed.

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

Acknowledgments: the work was carried out with the support of 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. Algorithm for coordinated trajectory control of quadcopter motion. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 5. P. 385–394 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-385-394.

Введение. Траекторное управление можно разделить на два вида — следящее и согласованное [1]. В первом случае задается желаемое значение регулируемых переменных (положение и ориентация) в каждый момент времени, а ошибка регулирования представляет собой рассогласование между желаемым и текущим значениями выходных переменных объекта [2–4]. Такой подход подразумевает преодоление кратчайшего расстояния между текущим положением

и заданным и не предполагает наличия подвижных препятствий на пути движения. Если же кратчайший путь проходит через стены, препятствия, запрещенные зоны, и при этом на объект действуют неизмеряемые возмущения, то задача точного планирования геометрического места объекта в пространстве становится несостоятельной. В этом случае целесообразно использовать метод согласованного управления, где задана траектория движения и скорость движения вдоль этой кривой. Тогда ошибка регулирования — это кратчайшее расстояние от текущего положения робота до желаемой траектории, а также рассогласование по линейной скорости и ориентации [5–7]. В этом случае предпочтение отдается минимальному отклонению от траектории, которая имеет большое число поворотов с обходом препятствий.

В настоящей статье решена задача согласованного управления движением квадрокоптера вдоль гладкой пространственной траектории по измерениям линейных координат и угла рыскания [2–4]. Динамическая модель движения такого объекта в пространстве является нелинейной, а модель отклонений робота от заданной траектории сложнее из-за возникающей голономной связи между всеми регулируемым переменными [1, 5–7]. Задача управления таким многомерным объектом осложняется тем, что относительная степень по каждому каналу управления не одинакова, а декомпозиция модели на однородные подсистемы, как в случае с динамическим позиционированием в точке [2–4], не представляется возможной.

В [2, 3] используется неполная модель движения, которая не учитывает динамику угла рыскания. Кроме того, предложенные алгоритмы следящего управления предполагают неочевидную методику настройки, при которой значения параметров регулятора должны быть выбраны исходя из соблюдения условий, связанных с доказательством утверждений. В [4] учтены выявленные недостатки, в результате чего получена полная модель движения квадрокоптера для задачи динамического позиционирования в точке; на основе этой модели синтезирован динамический алгоритм следящего управления с упрощенной методикой настройки регулятора, но предполагается измерение вектора состояния.

Алгоритм согласованного управления движением вдоль гладкой траектории в терминах геометрического подхода, как и в [2–4], представлен в [7], но для движения мобильного робота на плоскости. В настоящей статье с использованием подходов, изложенных в [4, 7], решена задача синтеза закона управления движением квадрокоптера вдоль пространственной кривой по измерениям выходных регулируемых переменных.

Постановка задачи. Рассмотрим декартову систему координат $OXYZ$ и робот типа квадрокоптер с линейными координатами $P = \text{col}(x, y, z)$ и ориентацией (угол рыскания, тангаж, крен) $\Theta = \text{col}(\varphi, \theta, \psi)$, движущийся в пространстве вдоль гладкой траектории S (рис. 1).

Кривая S может быть задана в виде системы уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} x_S &= \eta_x(s); \\ y_S &= \eta_y(s); \\ z_S &= \eta_z(s), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

параметризованной как геометрическое место точек, соответствующих путевой координате s . Другим способом задания кривой может быть пересечение двух гладких поверхностей, т. е. в виде системы двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} \eta_1(x_S, y_S, z_S) &= 0, \\ \eta_2(x_S, y_S, z_S) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Замечание 1. Следует отметить, что существует бесконечное множество пар функций η_1 и η_2 , пересечение которых соответствует пространственной кривой.

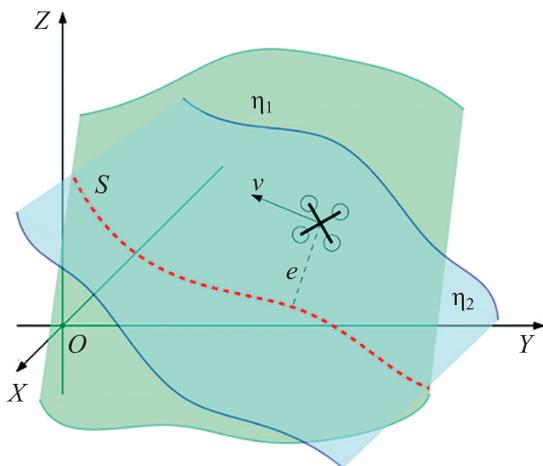


Рис. 1

Модель движения в пространстве без учета сил трения имеет следующий вид [4]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\varphi s_\theta c_\psi + s_\varphi s_\psi \\ s_\varphi s_\theta c_\psi - c_\varphi s_\psi \\ c_\theta c_\psi \end{bmatrix} (u_1 + g) - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где (x, y, z) и (φ, θ, ψ) — линейные и угловые координаты робота в пространстве; $M = \text{diag}\left\{\frac{1}{m}, \frac{C}{J_\varphi}, \frac{\ell}{J_\theta}, \frac{\ell}{J_\psi}\right\}$ — массагабаритные параметры; $F = \text{col}(F_1, F_2, F_3, F_4)$ — силы, развиваемые пропеллерами; $U = \text{col}(u_1, u_2, u_3, u_4)$ — вспомогательные переменные или виртуальные управления, и введены обозначения $c_{(\cdot)} = \cos(\cdot)$ и $s_{(\cdot)} = \sin(\cdot)$.

Требуется разработать закон управления F , обеспечивающий движение робота вдоль кривой S с заданной скоростью V^* , ориентацией $\Theta^*(s)$ и отклонением:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (s - V^*) \leq \tilde{V}_{\max}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} (\Theta(t) - \Theta^*(s)) \leq \tilde{\Theta}_{\max}, \quad \text{dist}(P, S) \leq e_{\max}, \quad (5)$$

где выполняются условия $\tilde{V}_{\max} > 0, \tilde{\Theta}_{\max} > 0, e_{\max} > 0$.

Динамическая модель отклонения робота от траектории. Отклонение робота от пространственной траектории определим с помощью трех линейных и одной угловой координат:

$$s = \Sigma(P), \quad e_1 = E_1(P), \quad e_2 = E_2(P), \quad \delta_\varphi = \varphi - \varphi^*(s), \quad \delta_\theta = \theta, \quad \delta_\psi = \psi, \quad (6)$$

где функция $\Sigma(P)$ определяет ближайшую к роботу точку на кривой S ; линейные функции $E_1(P)$ и $E_2(P)$ определяют расстояние от робота до двух плоскостей $E_1(P) = 0$ и $E_2(P) = 0$, пересечение которых соответствует вектору заданной скорости V^* вдоль касательной к кривой S (рис. 2, а, плоскость E_1 проходит через вектор V^* параллельно оси OZ , плоскость E_2 проходит через вектор V^* перпендикулярно E_1); заданный угол рыскания $\varphi^*(s)$ связан с направлением вектора V_{XY}^* , являющегося проекцией вектора V^* на плоскость OXY и определяющего заданную скорость в горизонтальной плоскости (рис. 2, б). Заданный тангаж $\theta^*(s)$ и крен $\psi^*(s)$ примем равными нулю для всех s .

Замечание 2. В особом случае, когда вектор V^* параллелен оси OZ , заданный угол рыскания $\varphi^*(s)$ необходимо доопределить разработчику.

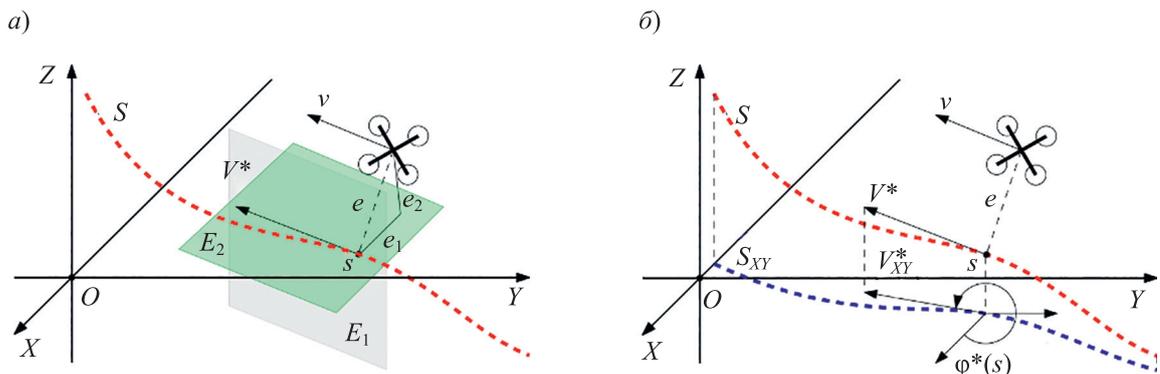


Рис. 2

Запишем кинематические соотношения между регулируемыми переменными s , e_1 , e_2 и координатами робота x , y , z . Для этого необходимо выполнить три однородных преобразования: одно линейное и два поворотных:

$$\begin{bmatrix} s \\ e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = R_{Y,\beta}^T R_{Z,\alpha}^T \begin{bmatrix} x - x_s \\ y - y_s \\ z - z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\beta & 0 & s_\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\beta & 0 & c_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\alpha & s_\alpha & 0 \\ -s_\alpha & c_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_s \\ y - y_s \\ z - z_s \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где первое преобразование соответствует параллельному переносу системы координат с началом в точке x_s , y_s , z_s (ближайшая точка кривой к роботу), далее поворот вокруг оси Z на угол $\alpha = \varphi^*(s)$ (угол между плоскостями E_1 и OYZ с учетом замечания 2) и поворот вокруг оси Y на угол β (угол между плоскостями E_2 и OXY).

Дифференцируя (7), получаем динамическую модель для линейных координат:

$$\begin{bmatrix} \dot{s} \\ \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & s_\alpha c_\beta & s_\beta \\ -s_\alpha & c_\alpha & 0 \\ -c_\alpha s_\beta & -s_\alpha s_\beta & c_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\varphi s_\theta c_\psi + s_\varphi s_\psi \\ s_\varphi s_\theta c_\psi - c_\varphi s_\psi \\ c_\theta c_\psi \end{bmatrix} (u_1 + g) - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Для угловых отклонений запишем упрощенную модель:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_\varphi \\ \dot{\delta}_\theta \\ \dot{\delta}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi} - \varepsilon \dot{s} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $\varepsilon = \frac{d\alpha}{ds}$ — кривизна проекции кривой S на плоскость OXY [5].

Модель движения в нормальной форме.

Утверждение 1. Пусть

$$u_1 = \text{sat}_{lg} \bar{u}_1,$$

где $\text{sat}_{lg}(\cdot)$ — гладкая функция насыщения с уровнем lg для любого $l \in (0, 1)$, а переменные \bar{u}_1 и u_2 — выходы двух интеграторов с входами v_1 и v_2 :

$$\ddot{\bar{u}}_1 = \rho_1, \quad \dot{\bar{u}}_1 = v_1, \quad \dot{u}_2 = \rho_2, \quad \dot{u}_2 = v_2, \quad (10)$$

при этом переменная u_1 удовлетворяет двойному неравенству

$$-lg \leq u_1 \leq lg. \quad (11)$$

Тогда модель (8), (9) может быть представлена в нормальной форме:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i &= \xi_{i+1}, \quad i = 1, 2, 3, \\ \dot{\xi}_4 &= q(\xi) + Wb(\xi, \varphi)\bar{U}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\xi = \text{col}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4) \in R^{16}$ — расширенный вектор переменных состояния; W — неособая 4×4 -матрица, зависящая от направления и кривизны траектории; $q(\xi, \varphi)$ и $b(\xi, \varphi)$ — функции соответствующих размерностей; $\xi_1 = \text{col}(s, e_1, e_2, \delta_\varphi)$ — регулируемые переменные, $\bar{U} = \text{col}(v_1, v_2, v_3, v_4)$ — управляющие входы.

Доказательство. Дифференцируя выход ξ_1 последовательно 4 раза, получаем соответствующее преобразование координат для ξ_2, ξ_3, ξ_4 :

$$\xi_2 = \dot{\xi}_1 = W(\alpha, \beta) \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}, \quad W(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & s_\alpha c_\beta & s_\beta & 0 \\ -s_\alpha & c_\alpha & 0 & 0 \\ -c_\alpha s_\beta & -s_\alpha s_\beta & c_\beta & 0 \\ -\varepsilon c_\alpha c_\beta & -\varepsilon s_\alpha c_\beta & -\varepsilon s_\beta & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Заметим, что определитель матрицы $W(\alpha, \beta)$ равен единице для всех значений углов α и β . Выражение для обратной матрицы имеет вид

$$W^{-1}(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & -s_\alpha & -c_\alpha s_\beta & 0 \\ s_\alpha c_\beta & c_\alpha & -s_\alpha s_\beta & 0 \\ s_\beta & 0 & c_\beta & 0 \\ \varepsilon & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Далее определим ξ_3 :

$$\xi_3 = \dot{\xi}_2 = \dot{W} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + W \begin{bmatrix} (c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi)(u_1 + g) \\ (s_\phi s_\theta c_\psi - c_\phi s_\psi)(u_1 + g) \\ c_\theta c_\psi (u_1 + g) - g \\ u_2 \end{bmatrix} = q_1(\xi) + b_1(\xi, \varphi) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$$q_1(\xi) = \bar{W}\dot{\xi}_2 + gT(c_\theta c_\psi - 1), \quad b_1(\xi, \varphi) = W \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & d \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi \\ s_\phi & c_\phi \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix};$$

$$\bar{W} = \dot{W}W^{-1}, \quad T = W \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \zeta_3 = s_\theta c_\psi, \quad \zeta_4 = -s_\psi, \quad d = u_1 + g.$$

Отметим, что соотношение (15) является обратимым. Действительно, в силу допущения (11) функция d , зависящая от u_1 , строго отделена от нуля, следовательно, справедливо соотношение

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} (c_\theta c_\psi)^{-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ d^{-1} \begin{bmatrix} c_\phi & s_\phi \\ -s_\phi & c_\phi \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} W^{-1}(\xi_3 - q_1(\xi_2, \theta, \psi)), \quad (16)$$

где видно, что $u_1 = u_1(\xi_2, \xi_3, \theta, \psi)$; отдельно рассматривая третью и четвертую строки матричного равенства (16) с учетом соотношений $\zeta_3 = s_\theta c_\psi$, $\zeta_4 = -s_\psi$, можно найти выражения для $\theta = \theta(\xi_2, \xi_3, \varphi)$ и $\psi = \psi(\xi_2, \xi_3, \varphi)$, откуда следует существование функций $u_{1,2} = u_{1,2}(\xi_2, \xi_3, \varphi)$, $\zeta_{3,4} = \zeta_{3,4}(\xi_2, \xi_3, \varphi)$.

Непосредственное вычисление дает

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} c_\theta^{-1} c_\psi^{-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ d^{-1} \begin{bmatrix} c_\phi & s_\phi \\ -s_\phi & c_\phi \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} W^{-1}(\xi_3 - \bar{W}\dot{\xi}_2) - g \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} (1 - c_\theta^{-1} c_\psi^{-1});$$

$$\begin{aligned}
u_1 &= c_\theta^{-1} c_\psi^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T W^{-1}(\xi_3 - \bar{W}\xi_2) - g(1 - c_\theta^{-1} c_\psi^{-1}) = \\
&= c_\theta^{-1} c_\psi^{-1} \left(\begin{bmatrix} s_\beta \\ 0 \\ c_\beta \\ 0 \end{bmatrix}^T \xi_3 + \begin{bmatrix} c_\beta \\ 0 \\ -s_\beta \\ 0 \end{bmatrix}^T \xi_2 \right) - g + g c_\theta^{-1} c_\psi^{-1} = u_1(\xi_2, \xi_3, \theta, \psi); \\
\begin{bmatrix} \zeta_3 \\ \zeta_4 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} s_\theta c_\psi \\ -s_\psi \end{bmatrix} = (u_1 + g)^{-1} \begin{bmatrix} c_\varphi & s_\varphi \\ -s_\varphi & c_\varphi \end{bmatrix} Q_1^T W^{-1}(\xi_3 - \bar{W}\xi_2) = \\
&= c_\theta c_\psi \left(\begin{bmatrix} s_\beta \\ 0 \\ c_\beta \\ 0 \end{bmatrix}^T \xi_3 + \begin{bmatrix} c_\beta \\ 0 \\ -s_\beta \\ 0 \end{bmatrix}^T \xi_2 + g \right)^{-1} \begin{bmatrix} c_\varphi & s_\varphi \\ -s_\varphi & c_\varphi \end{bmatrix} Q_1^T W^{-1}(\xi_3 - \bar{W}\xi_2),
\end{aligned}$$

откуда имеем

$$\begin{bmatrix} \operatorname{tg} \theta \\ -\operatorname{tg} \psi c_\theta^{-1} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} s_\beta \\ 0 \\ c_\beta \\ 0 \end{bmatrix}^T \xi_3 + \begin{bmatrix} c_\beta \\ 0 \\ -s_\beta \\ 0 \end{bmatrix}^T \xi_2 + g \right)^{-1} \begin{bmatrix} c_\varphi & s_\varphi \\ -s_\varphi & c_\varphi \end{bmatrix} Q_1^T W^{-1}(\xi_3 - \bar{W}\xi_2) = \tau_3(\xi_2, \xi_3, \varphi)$$

и в итоге

$$\begin{aligned}
\theta &= \operatorname{arctg} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T \tau_3 \right) = \theta(\xi_2, \xi_3, \varphi), \\
\psi &= \operatorname{arctg} \left(- \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T \tau_3 \cos \left(\operatorname{arctg} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T \tau_3 \right) \right) = \psi(\xi_2, \xi_3, \varphi).
\end{aligned}$$

На следующем шаге определим ξ_4 :

$$\dot{\xi}_4 = \dot{\xi}_3 = \dot{q}_1(\xi) + \dot{b}_1(\xi, \varphi) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \end{bmatrix} + b_1(\xi, \varphi) \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \dot{\zeta}_3 \\ \dot{\zeta}_4 \end{bmatrix} \quad (17)$$

и вычислим $\dot{\xi}_4$:

$$\dot{\xi}_4 = \ddot{q}_1(\xi) + \ddot{b}_1(\xi, \varphi) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \end{bmatrix} + 2\dot{b}_1(\xi, \varphi) \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \dot{\zeta}_3 \\ \dot{\zeta}_4 \end{bmatrix} + b_1(\xi, \varphi) \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \ddot{\zeta}_3 \\ \ddot{\zeta}_4 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Выполняя дифференцирование всех членов в (18), можно получить выражение (12), где

$$q(\xi, \varphi) = f_1(\xi) + f_2(\xi) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \end{bmatrix} + 2\dot{b}_1(\xi, \varphi) \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \dot{\zeta}_3 \\ \dot{\zeta}_4 \end{bmatrix} + b_1(\xi, \varphi) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -s_\theta c_\psi (\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2) - 2c_\theta s_\psi \dot{\theta} \dot{\psi} \\ s_\psi \dot{\psi}^2 \end{bmatrix};$$

$$b(\xi, \varphi) = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & d \begin{bmatrix} c_\varphi & s_\varphi \\ s_\varphi & -c_\varphi \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} + \tilde{b}(\xi);$$

$$\tilde{b}(\xi) = \begin{bmatrix} \tilde{b}_{11}(\xi) & \tilde{b}_{12}(\xi) \\ \tilde{b}_{21}(\xi) & \tilde{b}_{22}(\xi) \end{bmatrix}, \quad \tilde{b}_{11}(\xi) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{b}_{22}(\xi) = -g \begin{bmatrix} s_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\tilde{b}_{12}(\xi) = d \begin{bmatrix} c_\varphi & s_\varphi \\ s_\varphi & -c_\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi - 1 & s_\theta s_\psi \\ 0 & c_\psi - 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \zeta_3^2 & c_\theta s_\psi \zeta_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\tilde{b}_{21}(\xi) = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi - 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_\varphi & -s_\varphi \\ s_\varphi & c_\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 & -du_2 \\ u_2 & du_1 \end{bmatrix},$$

а функции $f_1(\xi)$, $f_2(\xi)$ и $b_1(\xi)$ представлены далее (см. след. раздел). Заметим, что $q(0, \varphi) = 0$ и $\tilde{b}(0, \varphi) = 0$, а матрица $b(0, \varphi)$ обратима в любой момент времени.

Дополнительные вычисления. Для упрощения расчетов приведем вспомогательные вычисления:

$$\dot{q}_1(\xi) = \dot{\bar{W}}\xi_2 + \bar{W}\xi_3 + g\dot{T}(c_\theta c_\psi - 1) - gT \begin{bmatrix} s_\theta c_\psi \\ c_\theta s_\psi \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix};$$

$$\ddot{q}_1(\xi) = f_1(\xi) - gT \begin{bmatrix} s_\theta c_\psi \\ c_\theta s_\psi \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \end{bmatrix};$$

$$f_1(\xi) = \ddot{\bar{W}}\xi_2 + 2\dot{\bar{W}}\xi_3 + \bar{W}\xi_4 + gT(c_\theta c_\psi - 1) - 2g\dot{T} \begin{bmatrix} s_\theta c_\psi \\ c_\theta s_\psi \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} - gT(c_\theta c_\psi \dot{\theta}^2 - s_\theta s_\psi \dot{\theta}\dot{\psi} + c_\theta c_\psi \dot{\psi}^2);$$

$$b_1(\xi) = W \left(Q_2^T \begin{bmatrix} c_\theta s_\psi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} Q_1 + Q_1^T \begin{bmatrix} c_\varphi & -s_\varphi \\ s_\varphi & c_\varphi \end{bmatrix} Q_2 d \right);$$

$$\dot{b}_1(\xi, \varphi) = \dot{W} \left(Q_2^T \begin{bmatrix} c_\theta s_\psi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} Q_1 + Q_1^T \begin{bmatrix} c_\varphi & -s_\varphi \\ s_\varphi & c_\varphi \end{bmatrix} Q_2 d \right) +$$

$$+ W Q_1^T \begin{bmatrix} c_\varphi & -s_\varphi \\ s_\varphi & c_\varphi \end{bmatrix} Q_2 p_1 - W Q_1^T \begin{bmatrix} s_\varphi & c_\varphi \\ -c_\varphi & s_\varphi \end{bmatrix} Q_2 d \dot{\varphi} - W Q_2^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} Q_1 \begin{bmatrix} s_\theta c_\psi \\ c_\theta s_\psi \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix};$$

$$\ddot{b}_1(\xi) = f_2(\xi) + W Q_1^T \begin{bmatrix} c_\varphi & -s_\varphi \\ s_\varphi & c_\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 & -dv_2 \\ dv_2 & v_1 \end{bmatrix} Q_2 - W Q_2^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} Q_1 \begin{bmatrix} s_\theta c_\psi \\ c_\theta s_\psi \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \end{bmatrix};$$

$$f_2(\xi) = \ddot{W} \left(Q_2^T \begin{bmatrix} c_\theta s_\psi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} Q_1 + Q_1^T \begin{bmatrix} c_\varphi & -s_\varphi \\ s_\varphi & c_\varphi \end{bmatrix} Q_2 d \right) +$$

$$+ \dot{W} Q_1^T \begin{bmatrix} c_\varphi & -s_\varphi \\ s_\varphi & c_\varphi \end{bmatrix} Q_2 p_1 - \dot{W} Q_1^T \begin{bmatrix} s_\varphi & c_\varphi \\ -c_\varphi & s_\varphi \end{bmatrix} Q_2 d \dot{\varphi} - \dot{W} Q_2^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} Q_1 \begin{bmatrix} s_\theta c_\psi \\ c_\theta s_\psi \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} -$$

$$- 2W Q_1^T \begin{bmatrix} s_\varphi & c_\varphi \\ -c_\varphi & s_\varphi \end{bmatrix} Q_2 p_1 \dot{\varphi} - W Q_2^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} Q_1 (c_\theta c_\psi \dot{\theta}^2 - 2s_\theta s_\psi \dot{\theta}\dot{\psi} + c_\theta c_\psi \dot{\psi}^2);$$

$$\begin{bmatrix} \zeta_3 \\ \zeta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_\theta c_\psi \\ -s_\psi \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{\zeta}_3 \\ \dot{\zeta}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & -s_\theta s_\psi \\ 0 & -c_\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\xi}_3 \\ \ddot{\xi}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_\theta c_\psi (\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2) - 2c_\theta s_\psi \dot{\theta} \dot{\psi} \\ s_\psi \dot{\psi}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & -s_\theta s_\psi \\ 0 & -c_\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \end{bmatrix},$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} I_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Q_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad I_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Синтез робастного закона управления по выходу. Для синтеза закона управления, обеспечивающего все три цели (5), необходимо указать заданное значение для выходной переменной. Пусть $\xi_1^* = \text{col}(V^*t, 0, 0, 0)$ и $\xi_2^* = \text{col}(V^*, 0, 0, 0)$. Введем замену переменных:

$$\tilde{\xi}_1 = \xi_1 - \xi_1^*, \quad \tilde{\xi}_2 = \xi_2 - \xi_2^*, \quad \tilde{\xi}_3 = \xi_3, \quad \tilde{\xi}_4 = \xi_4. \quad (19)$$

Дифференцируя $\tilde{\xi}_1$, получаем модель вида

$$\dot{\tilde{\xi}}_1 = \tilde{\xi}_2, \quad \dot{\tilde{\xi}}_2 = \tilde{\xi}_3, \quad \dot{\tilde{\xi}}_3 = \tilde{\xi}_4, \quad \dot{\tilde{\xi}}_4 = \tilde{q}(\tilde{\xi}, \varphi, V^*) + b(\tilde{\xi}, \varphi)\bar{U},$$

где $\tilde{q}(\tilde{\xi}, \varphi, V^*) = q(\text{col}(\tilde{\xi}_1 + \xi_1^*, \tilde{\xi}_2 + \xi_2^*, \tilde{\xi}_3, \tilde{\xi}_4)) = q(\tilde{\xi}, \varphi) + \Delta(\ddot{W}, V^*)$ а член $\Delta(\ddot{W}, V^*)$ пренебрежимо мал при ограниченной кривизне заданной траектории.

Утверждение 2. Закон управления вида

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} M^{-1} \begin{bmatrix} u_1 + g \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \bar{U}; \quad (20)$$

$$\bar{U} = b(\tilde{\xi}, \varphi)^{-1} [-\tilde{q}(\tilde{\xi}, \varphi, V^*) - \gamma_1 \tilde{\xi}_1 - \gamma_2 \tilde{\xi}_2 - \gamma_3 \tilde{\xi}_3 - \gamma_4 \tilde{\xi}_4], \quad (21)$$

где параметры $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4 > 0$ соответствуют некоторому гурвицеву полиному $\gamma(p) = p^4 + \gamma_4 p^3 + \gamma_3 p^2 + \gamma_2 p + \gamma_1$, обеспечивает глобальную локальную устойчивость замкнутой системы и достижение цели (5).

Доказательство. Модель замкнутой системы для отклонений (19) имеет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{\xi}}_1 \\ \dot{\tilde{\xi}}_2 \\ \dot{\tilde{\xi}}_3 \\ \dot{\tilde{\xi}}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_4 \\ -\gamma_1 I_4 & -\gamma_2 I_4 & -\gamma_3 I_4 & -\gamma_4 I_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\xi}_1 \\ \tilde{\xi}_2 \\ \tilde{\xi}_3 \\ \tilde{\xi}_4 \end{bmatrix}, \quad I_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

откуда нетрудно показать, что если параметры $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ выбраны как соответствующие коэффициенты типовых (гурвицевых) характеристических полиномов $\gamma(p) = p^4 + \gamma_4 p^3 + \gamma_3 p^2 + \gamma_2 p + \gamma_1$ или вычислены методом модального управления, то все переменные отклонений (19) асимптотически стремятся к нулю, что гарантирует выполнение цели (5). Локальный характер устойчивости обусловлен ограничением (11).

Однако закон управления (21) требует измерений всех переменных состояния и в рамках рассматриваемой задачи является нереализуемым. Используя метод расширенного наблюдателя [8], можно исключить неизвестные члены.

Реализуемый закон управления по выходу имеет наряду с (20) также следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{U} &= \text{sat}_M [b(0, \varphi)^{-1} (-\sigma - \gamma_1 \tilde{\xi}_1 - \gamma_2 \tilde{\xi}_2 - \gamma_3 \tilde{\xi}_3 - \gamma_4 \tilde{\xi}_4)]; \\ \dot{\tilde{\xi}}_1 &= \tilde{\xi}_2 + \kappa a_1 (\tilde{\xi}_1 - \hat{\xi}_1), \quad \dot{\tilde{\xi}}_2 = \tilde{\xi}_3 + \kappa^2 a_2 (\tilde{\xi}_1 - \hat{\xi}_1), \quad \dot{\tilde{\xi}}_3 = \tilde{\xi}_4 + \kappa^3 a_3 (\tilde{\xi}_1 - \hat{\xi}_1), \\ \dot{\tilde{\xi}}_4 &= \sigma + b(0, \varphi)\bar{U} + \kappa^4 a_4 (\tilde{\xi}_1 - \hat{\xi}_1), \quad \dot{\sigma} = \kappa^5 a_5 (\tilde{\xi}_1 - \hat{\xi}_1), \end{aligned}$$

где $\text{sat}_N(\cdot)$ — гладкая функция насыщения с уровнем N ; входной сигнал $\tilde{\xi}_1$ определен в (19); коэффициенты a_i , $i = \overline{1, 5}$, соответствуют гурвицеву полиному $a(p) = p^5 + a_1p^4 + a_2p^3 + a_3p^2 + a_4p + a_5$, а коэффициент усиления к больше некоторого числа $k_0 = k_0(\xi(0)) > 0$, зависящего от начальных условий объекта.

Заключение. В работе решена задача согласованного управления движением квадрокоптера вдоль гладкой пространственной траектории. В отличие от [4] рассмотрена постановка задачи управления движением квадрокоптера по выходу, а в отличие от [7], где решена задача согласованного управления движением по траектории на плоскости, в настоящей статье решена задача управления движением в трехмерном пространстве. В дальнейшем планируется проведение натурных экспериментальных исследований синтезированного закона управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб: Наука, 2000. 549 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Бурдаков С. Ф., Мирошник И. В., Стельмаков Р. Э. Системы управления движением колесных роботов. СПб: Наука, 2001. 232 с.
6. Бушуев А. Б., Исаева Е. Г., Морозов С. Н., Чепинский С. А. Управление траекторным движением многоканальных динамических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 11. С. 50–56.
7. Хоанг Д. Т., Пыркин А. А. Синтез алгоритма робастного управления движением мобильного робота вдоль гладкой траектории // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 7. С. 500–512.
8. Freidovich L. B., Khalil H. K. Performance recovery of feedback-linearization-based designs // IEEE Trans. on Automatic Control. 2008. Vol. 53, N 10. P. 2324–2334.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Станислав Александрович Ким** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: skim@itmo.ru
- Антон Александрович Пыркин** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; 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 16.01.2024; одобрена после рецензирования 19.01.2024; принята к публикации 22.03.2024.

REFERENCES

1. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. *Nelineynoye i adaptivnoye upravleniye slozhnyimi dinamicheskimi sistemami (Nonlinear and Adaptive Control of Complex Dynamic Systems)*, St. Petersburg, 2000, 549 p. (in Russ.)
2. Borisov O. I., Pyrkin A. A., Isidori A. *PapersOnLine*, 2019, no. 16(52), pp. 837–842, DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.067.
3. Borisov O. I., Kakanov M. A., Zhivitskii A. Yu., Pyrkin A. A. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 12(64), pp. 982–992 (in Russ.)
4. Kim S. A., Pyrkin A. A., Borisov O. I. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 10(66), pp. 834–844 (in Russ.)
5. Burdakov S. F., Miroshnik I. V., Stel'makov R. E. *Sistemy upravleniya dvizheniyem kolesnykh robotov (Motion Control Systems for Wheeled Robots)*, St. Petersburg, 2001, 232 p. (in Russ.)
6. Bushuev A. B., Isaeva E. G., Morozov S. N., Chepinsky S. A. *Journal of Instrument Engineering*, 2009, no. 11(52), pp. 50–56 (in Russ.)
7. Hoang Duc Thinh, Pyrkin A. A. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 7(65), pp. 500–512, DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-7-500-512 (in Russ.).
8. Freidovich L. B., Khalil H. K. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, no. 10(53), pp. 2324–2334.

DATA ON AUTHORS

- Stanislav A. Kim** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: skim@itmo.ru
- Anton A. Pyrkin** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; 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 16.01.2024; approved after reviewing 19.01.2024; accepted for publication 22.03.2024.

СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ
НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОАГЕНТНЫХ АЛГОРИТМОВ

О. В. Есиков^{1*}, Д. О. Есиков², А. В. Данилов³, М. С. Земляницын⁴

¹ Центральное конструкторское бюро аппаратостроения, Тула, Россия
* eovmail@rambler.ru

² Вымпелком-Информационные технологии, Тула, Россия

³ Филиал Военной академии материально-технического обеспечения, Пенза, Россия

⁴ Тульский государственный университет, Тула, Россия

Аннотация. Для определения рационального варианта маршрута движения летательного аппарата с учетом рельефа местности предложен способ решения соответствующей задачи на основе комплексного применения многоагентных алгоритмов стохастического поиска. Для оценки качества маршрута движения летательного аппарата с учетом ограничений, накладываемых на задачу, предложено использовать комплексный критерий в виде штрафной функции. Разработан алгоритм формирования опорного варианта маршрута на основе результатов решения задачи методом динамики формирования рек, получение рационального маршрута движения летательного аппарата осуществляется методом роя частиц. Данные опорного варианта маршрута используются для определения значений параметров алгоритма метода роя частиц и его инициализации. Представлены результаты экспериментальной проверки, демонстрирующие работоспособность и эффективность предложенного способа.

Ключевые слова: планирование маршрута, многоагентный алгоритм, летательный аппарат, локальная оптимизация, стохастический поиск

Ссылка для цитирования: Есиков О. В., Есиков Д. О., Данилов А. В., Земляницын М. С. Способ построения маршрута движения летательного аппарата с учетом рельефа местности на основе комплексного применения многоагентных алгоритмов // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 5. С. 395–405. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-395-405.

METHOD FOR CONSTRUCTING AN AIRCRAFT ROUTE TAKING INTO ACCOUNT THE TERRAIN
BASED ON THE INTEGRATED USE OF MULTI-AGENT ALGORITHMS

O. V. Yesikov^{1*}, D. O. Yesikov², A. V. Danilov³, M. S. Zemlyanitsyn⁴

¹ Central Design Bureau of Apparatus Engineering, Tula, Russia
* eovmail@rambler.ru

² VimpelCom–Information Technologies LLC, Tula, Russia

³ Branch of the Military Academy of Logistics, Penza, Russia

⁴ Tula State University, Tula, Russia

Abstract. To determine a rational route for an aircraft, taking into account the terrain, a method for solving the corresponding problem is proposed based on the integrated use of multi-agent stochastic search algorithms. To assess the quality of the aircraft's route, taking into account the restrictions imposed on the problem, it is proposed to use a complex criterion in the form of a penalty function. An algorithm for generating a reference route option is developed based on the results of solving the problem using the method of river formation dynamics. A rational route for the

movement of an aircraft is carried out using the particle swarm method. The data of the reference variant of the route of the aircraft are used to determine the values of the parameters of the algorithm of the particle swarm method and its initialization. Results of an experimental test are presented, demonstrating the performance and effectiveness of the described method.

Keywords: route planning, multi-agent algorithm, aircraft, local optimization, stochastic search

For citation: Yesikov O. V., Yesikov D. O., Danilov A. V., Zemlyanitsyn M. S. Method for constructing an aircraft route taking into account the terrain based on the integrated use of multi-agent algorithms. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 5. P. 395–405 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-395-405.

Введение. Задача планирования маршрута летательного аппарата (ЛА) является частью этапа предполетной подготовки [1]. Построение маршрута полета ЛА сводится к формированию последовательности точек, подлежащих облету (промежуточных пунктов маршрута — ППМ). Результат решения этой задачи существенно влияет на целевую эффективность ЛА и безопасность его полета [1–3].

Исходными данными задачи являются значения координат начальной и конечной точек маршрута, карта высот рельефа местности, высота полета ЛА. Планирование маршрута движения ЛА сводится к определению значений координат совокупности ППМ, обеспечивающих экстремальное значение принятого показателя эффективности.

В качестве ограничений, накладываемых на задачу, принимаются следующие:

- полет ЛА должен осуществляться на заданной высоте;
- на всем протяжении маршрута полета расстояние до поверхности земли не должно быть меньше заданной величины;
- радиус кривизны участков траектории ЛА, задаваемых двумя последовательными параметрами ППМ, не должен быть меньше заданной величины.

Решению задачи формирования маршрутов полета ЛА в различных условиях, в том числе с учетом препятствий, посвящены работы [4–14]. В указанных работах число ППМ и их местоположение считается заданным или определяется узлами сетки геотопологической модели местности, над которой планируется полет. При этом построение маршрута движения ЛА сводится к одному из следующих вариантов:

- 1) решение задачи о коммивояжере [10, 11, 13];
- 2) поиск на графе [4–6, 8, 9];
- 3) применение аналитических моделей и эвристических методов [7, 12, 14, 15].

В первом и втором случаях решение задачи в указанных работах выполнялось методами дискретной оптимизации и поиска на графах, а также с использованием многоагентных алгоритмов (генетический алгоритм (ГА), муравьиный алгоритм). Построение маршрута движения ЛА посредством решения задачи о коммивояжере выполняется на фиксированном наборе ППМ с заданными координатами. При этом время решения задачи известными методами (ГА, муравьиный алгоритм, методы дискретной оптимизации) экспоненциально увеличивается с ростом ее размерности (числа ППМ). При использовании поиска на графах точность решения ограничивается параметрами дискретности применяемых моделей и может достигать нескольких тысяч метров [4], что, например, для случая полета ЛА на низких высотах в условиях сложного рельефа местности является недопустимо большим.

При планировании полета на малых высотах число и местоположение ППМ определяются не только полетным заданием, но и рельефом местности, над которой полет будет выполняться. К настоящему времени отсутствуют способы определения количества ППМ, обеспечивающие минимальную длину маршрута с выполнением условий всех ограничений, накладываемых на решаемую задачу для произвольных исходных данных.

Преимущество многоагентных алгоритмов [16], таких как ГА, метод роя частиц, метод косяка рыб и др., заключается в нечувствительности к виду целевой функции и принятым ограничениям, хорошей приспособленности к распараллеливанию процесса вычислений. Недостатки

данных алгоритмов — значительное влияние результатов начальной инициализации на решение задачи и необходимость задания значений определенного числа параметров алгоритмов перед выполнением расчетов.

Настоящая статья посвящена способу решения задачи построения маршрута движения ЛА с учетом рельефа местности, обеспечивающему получение рационального решения высокого качества с автоматическим определением числа ППМ, значений параметров алгоритма решения и нивелированием влияния начальной инициализации на результат решения алгоритма.

Критерий оценки качества маршрута движения ЛА. Оценивать качество маршрута движения ЛА предлагается на основе применения комплексного показателя, представленного функцией штрафа следующего вида [2, 17]:

$$F = \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3 + \alpha_4 f_4,$$

где α_i , $i = 1, \dots, 4$, — весовые коэффициенты; параметры f_i , $i = 1, 2, \dots, 4$, задают условия и ограничения полета: f_1 — число ячеек сетки карты высот, в которых траектория движения с заданной высотой пересекает рельеф местности; f_2 — длина маршрута; f_3 — характеристика траектории, предназначенная для обеспечения безопасного расстояния до поверхности на всем протяжении маршрута; f_4 — параметр, предназначенный для обеспечения радиусов кривизны участков траектории не менее заданных.

Для определения f_4 рассчитывается угол, образуемый двумя последовательными фрагментами траектории (определяются ППМ), и, если его величина будет менее допустимой, добавляется значение штрафа.

В качестве одного из параметров эффективности маршрута в ряде случаев (особенно характерных для беспилотных ЛА малых классов) представляет интерес рассмотрение не длины (или не только длины) маршрута, а продолжительности полета, в том числе с учетом влияния атмосферных и погодных явлений, например ветра. Для этого в штрафную функцию могут быть либо введены новые слагаемые, либо откорректирован параметр f_2 [14, 15].

Весовые коэффициенты α_i , $i = 1, \dots, 4$, определяются экспериментально [4] и задают уровень жесткости выполнения условий полета, вплоть до запретительного, например, на пересечение рельефа, пролет над поверхностью земли на расстоянии менее допустимого. В связи с тем, что слагаемое $\alpha_1 f_1$ играет основную роль в обеспечении безопасности полета ЛА при планировании маршрута, значение весового коэффициента α_1 необходимо задавать существенно превышающим вес других параметров, что обуславливает жесткость ограничения на минимальную высоту полета.

Недопущение случаев пересечения одних участков маршрута другими при его планировании возможно путем введения дополнительного параметра в штрафную функцию.

В работах [14, 15, 17] для решения задачи построения маршрута движения ЛА с применением вышеприведенного критерия предложено использовать многоагентные алгоритмы стохастического поиска [16, 18–22].

Особенности применения многоагентных алгоритмов. Решение задачи построения маршрута движения ЛА методом роя частиц (МРЧ) осуществляется путем минимизации значения функции штрафа [3, 17].

Алгоритм метода роя частиц представляет собой многошаговый процесс перемещения частиц в многомерном пространстве поиска решения, размерность которого определяется заданным числом ППМ N [15, 19, 20]. Направление движения частиц определяется их текущим положением, лучшим положением на предыдущих шагах, а также положением лучшей, в смысле минимума штрафной функции, частицы в рое.

Начальная инициализация исходных множеств агентов (частиц) в МРЧ производится случайным образом, с недопущением дублирования агентов. Для снижения влияния начальной инициализации роя на результат и получения более стабильного и высокого по качеству

решения предложено использовать островную схему реализации данного алгоритма [14—16] с кольцевой схемой миграции агентов.

Перед решением задачи МРЧ требуется задать ее размерность (число ППМ) и параметры алгоритма (число роев, размер роя, число итераций, число шагов в итерации). Математически обоснованных способов определения значений параметров МРЧ для решения задач с произвольным набором исходных данных к настоящему времени не существует. Обычно данные значения определяются экспериментально, что затрудняет практическое использование этого метода для решения прикладных задач.

Для определения значений параметров алгоритма для заданного числа ППМ предложено использовать экспериментально определенные аппроксимирующие зависимости [15], обеспечивающие получение решения высокого качества за ограниченное время.

Кроме этого, вследствие особенностей комплексного критерия качества маршрутов движения ЛА при решении задачи МРЧ возможны случаи, когда вариант маршрута, нарушающий принятие ограничения, будет иметь наилучшее значение штрафной функции. Для недопущения этого требуется либо более точная настройка весовых коэффициентов α_i для каждого из вариантов исходных данных, что само по себе нетривиальная задача, либо наличие некоторого опорного варианта маршрута движения ЛА, близкого к экстремуму целевой функции при инициализации роя. Наличие опорного варианта маршрута позволит значительно снизить как возможность появления таких случаев, так и влияние начальной инициализации алгоритма на качество получаемого решения.

Для заданного варианта исходных данных с целью определения числа ППМ и близкого, в смысле выбранного критерия оптимальности, к искомому экстремуму варианта маршрута (для применения в начальной инициализации алгоритма МРЧ) предлагается использовать результат предварительного решения задачи методом динамики формирования рек (МДФР) [23]. Этот метод отличается невысокой вычислительной сложностью и не требует для получения результата настройки значительного (как в МРЧ) числа параметров и задания размерности решаемой задачи (количества ППМ).

Принцип работы алгоритма МДФР заключается в имитации процесса формирования русел рек.

Применительно к решаемой задаче создается набор агентов (капель), которые перемещаются под действием силы тяжести между узлами (ячейками) карты высот от начальной к конечной, исследуя пространство в поиске наилучшего решения. Закрепление промежуточных результатов поиска решения выполняется имитацией механизмов эрозии и осадения грунта, связанных с изменением значений ячеек карты высот. В результате выполнения алгоритма МДФР на заданной карте высот формируется последовательность ячеек, определяющая кратчайший из найденных путь агентов от начальной ячейки маршрута к конечной.

Для определения положения ППМ движения ЛА на карте высот по результатам решения задачи МДФР предложен алгоритм, схема которого представлена на рис. 1, где $Path$ — массив координат ячеек, входящих в результирующий путь из начальной точки в конечную (результат решения задачи МДФР); $Track$ — список координат ППМ; H^p — заданная высота полета ЛА. Применение данного алгоритма позволяет сформировать последовательность ППМ минимальной длины, задающую маршрут из начальной точки в конечную с огибанием рельефа местности на заданной высоте полета ЛА.

Вследствие особенностей МДФР ППМ имеют координаты, совпадающие с центрами соответствующих ячеек карты высот, что не во всех случаях может удовлетворить требования по точности их расположения. Кроме того, при решении задачи МДФР не учитывается ограничение на минимальный радиус кривизны участка траектории движения ЛА, определяемый двумя последовательными отрезками маршрута.

Полученный в результате реализации МДФР маршрут движения ЛА может быть принят за опорный, как в части количества ППМ, так и их местоположения при инициализации МРЧ, для последующего уточнения полученного решения.

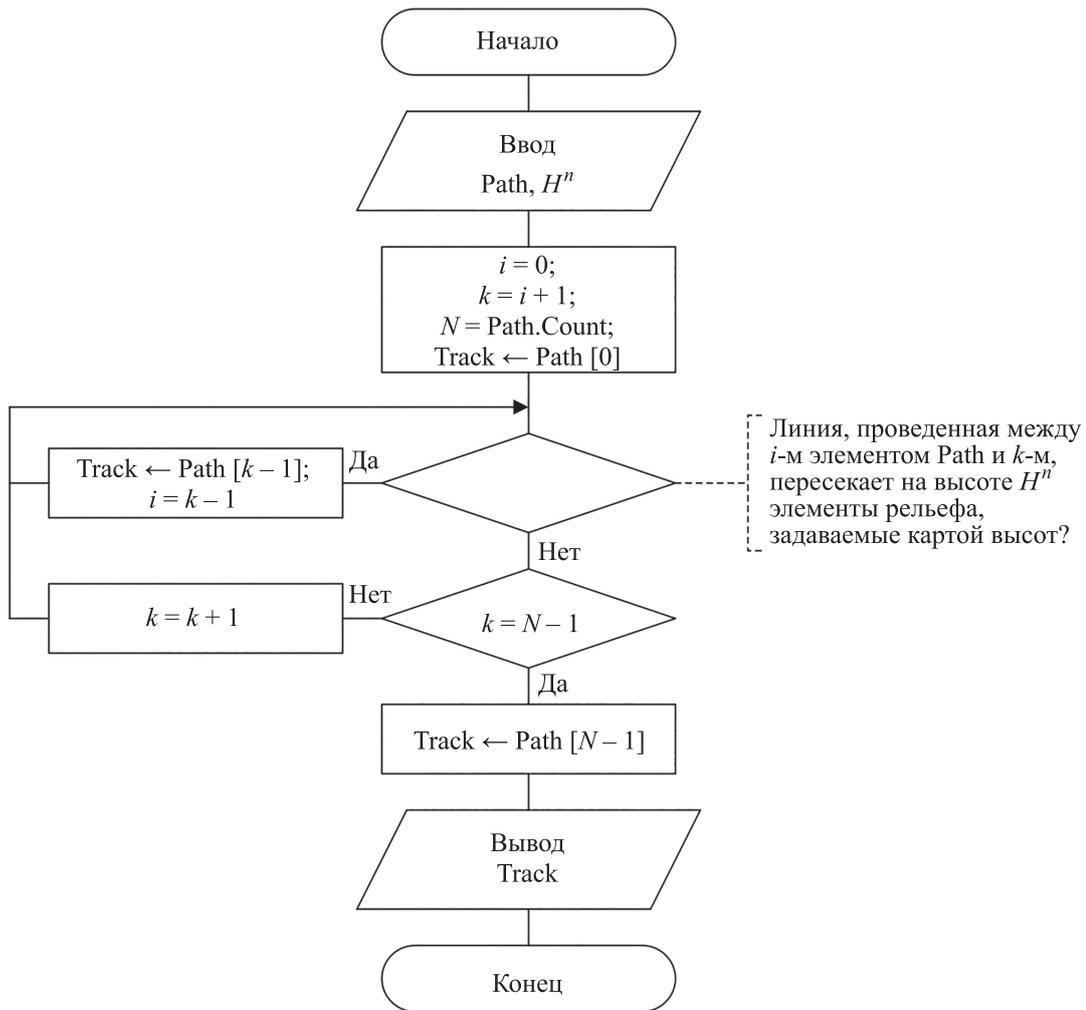


Рис. 1

Способ построения маршрута движения ЛА на основе комплексного применения многоагентных алгоритмов. Предлагается способ определения рационального варианта движения ЛА с учетом рельефа местности на основе комплексного применения МДФР и МРЧ, схема которого представлена на рис. 2.

Для заданных карты высот, координат начальной и конечной точек маршрута и высоты полета первоначально задача решается МДФР. На основе полученного МДФР результата с помощью предложенного алгоритма (см. рис. 1) определяется количество ППМ и их координаты. Полученный вариант маршрута движения ЛА принимается за опорный. Уточнение опорного варианта маршрута выполняется методом роя частиц. Относительно числа ППМ, входящих в опорный вариант, с применением аппроксимирующих зависимостей (табл. 1) [15] по изложенной в [24, 25] методике определяются значения параметров алгоритма МРЧ. При выполнении инициализации роя (роев) опорный маршрут движения ЛА включается в состав промежуточных вариантов решения задачи, задаваемых агентами. Это позволяет обеспечить ограничение сверху (при минимизации штрафной функции) на качество лучшего варианта маршрута для всего роя, что, в свою очередь, будет способствовать скорейшему его движению в направлении экстремума целевой функции, ближайшего к опорному варианту. Далее задача решается методом роя частиц с минимизацией значения комплексного критерия оценки качества маршрута [14, 15, 17].

Подобное построение вычислительного процесса позволит получить рациональный вариант маршрута ЛА высокого качества (не хуже опорного варианта, в смысле комплексного критерия), нивелируя влияние начальной инициализации МРЧ, с автоматическим определением размерности задачи и параметров метода решения.

Таблица 1

Число ППМ, N	Параметры алгоритма МРЧ				Время решения t , с
	Размер роя	Число шагов в итерации	Число роев	Число итераций	
6	350	120	5	4	13,55
10	500	150	6	5	62,05
15	800	300	7	6	378,29
20	1500	900	9	8	5166,72
Зависимости для расчета параметров	$5,62N^2 - 66,06N + 559,2$	$6,2N^2 - 107,62N + 560,8$	$0,28N + 3,2$	$0,28N + 2,2$	—

Примечание. Время решения определено для вычислительной системы со следующими параметрами: ОС Windows 10 Home × 64; процессор Intel Core i5-7300HQ с тактовой частотой 2,5 ГГц; объем оперативной памяти 8 Гб.

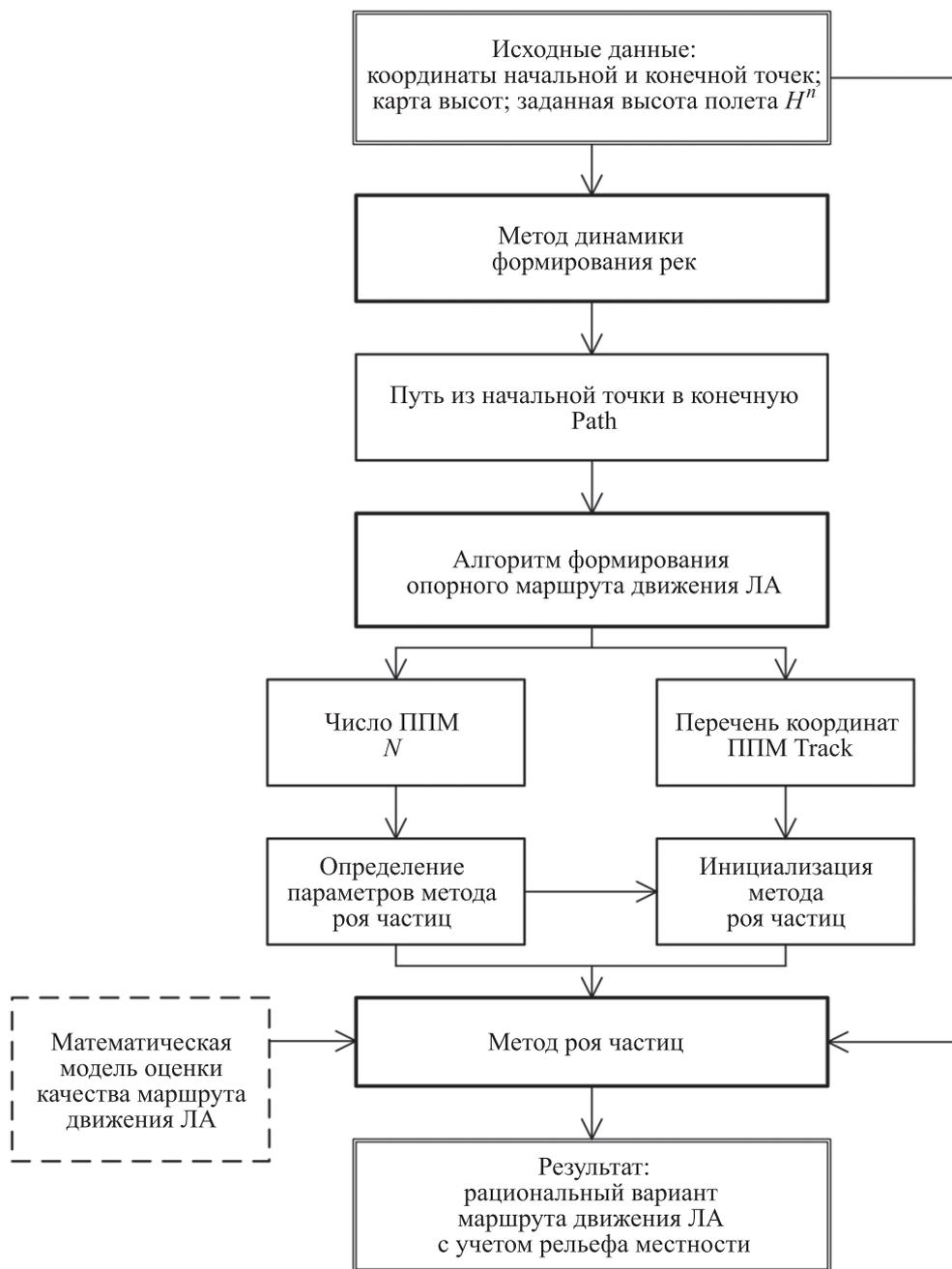


Рис. 2

Результаты эксперимента. Экспериментальная проверка эффективности предложенного способа решения задачи построения маршрута движения ЛА на основе комплексного применения многоагентных алгоритмов выполнялась для разных вариантов исходных данных полета:

- с огибанием зон, запрещенных для полета;
- в городской застройке;
- с огибанием рельефа местности.

Результаты экспериментальной проверки представлены на рис. 3 и в табл. 2, 3.

На рис. 3 приведены примеры решения задачи построения маршрута движения ЛА предлагаемым способом: *a* — с огибанием зон, запрещенных для полета; *b* — с огибанием рельефа местности (ущелье); *в* — в городской застройке. На рисунках синим цветом обозначены ячейки карты высот, вошедшие в решение задачи МДФР, а серой ломаной линией — местоположения ПППМ и опорный вариант маршрута движения, полученные на основе применения этого метода; белая ломаная линия соответствует уточненному посредством МРЧ маршруту движения ЛА.

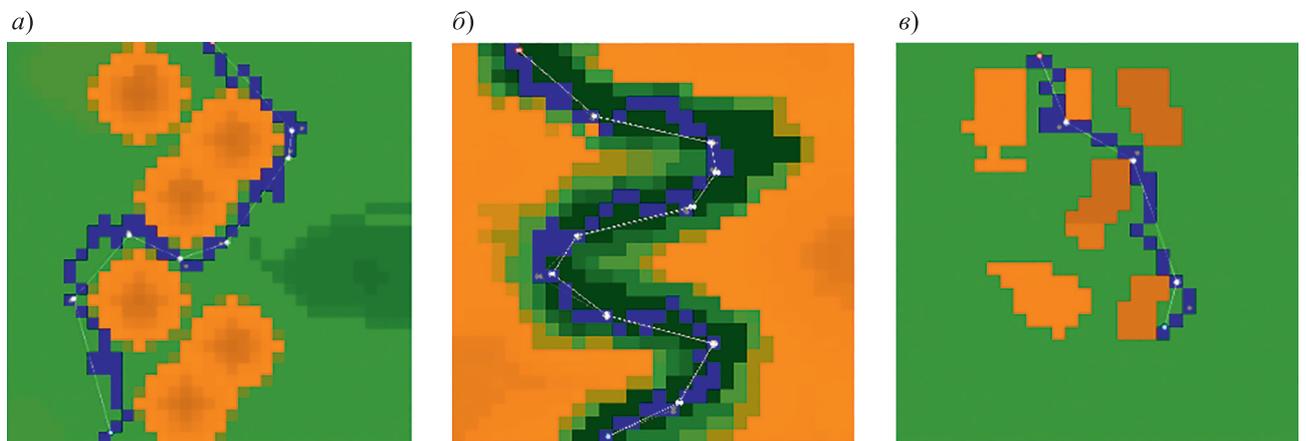


Рис. 3

Таблица 2

Вариант маршрута движения ЛА	Время решения t , с				Длина маршрута L , м			
	МДФР		МДФР + МРЧ		МДФР		МДФР + МРЧ	
	\bar{t}	СКО	\bar{t}	СКО	\bar{L}	СКО	\bar{L}	СКО
С огибанием зон, запрещенных для полета	42,7	0,4	76,5	4,8	27099,2	1165,8	26327,3	768,3
В городской застройке	32,5	1,1	58,9	3,0	1342	50	1287,5	41,5
С огибанием рельефа местности	35,2	0,4	91,3	37,2	17496,25	415,6	17100,15	398,3

Примечание. Результаты получены при следующих параметрах МДФР: количество агентов — 600; число шагов алгоритма — 60.

Таблица 3

Вариант маршрута движения ЛА	Число точек маршрута по результатам МДФР		Число ПППМ	L , м		t , м	
	Среднее значение	СКО		\bar{L}	СКО	\bar{t}	СКО
С огибанием зон, запрещенных для полета	7,2	0,7	6	26832	1415,2	31,7	2
В городской застройке	6,5	1,2	5	1494,1	100,3	21,7	1,4
С огибанием рельефа местности	11,1	1,14	10	17720,33	734,78	45,71	1,63

В табл. 2 приведены результаты оценки времени решения (t) задачи и длины (L) полученных маршрута движения ЛА для различных вариантов исходных данных. Анализ рис. 3 и табл. 2 показывает, что МДФР позволяет находить путь от начальной до конечной ячейки карты высот и определять опорный вариант маршрута движения ЛА.

В табл. 3 представлены результаты оценки длины маршрутов (L) движения и времени решения (t) задачи МРЧ без использования опорного варианта маршрута. Число ППМ оценивалось по результатам решения задачи МДФР с этими же вариантами карт высот. Параметры МРЧ определялись по зависимостям, приведенным в табл. 1.

Как видно из представленных результатов, комплексное применение метода динамики формирования рек и методы роя частиц дает более высокий по качеству результат по сравнению с решением задачи только методом роя частиц, но при большем времени решения задачи.

Алгоритм построения маршрута движения ЛА на основе решения задачи МДФР обеспечивает результат оценки длины маршрута, сопоставимый (не худший) с результатом, получаемым МРЧ. Следует отметить, что данное утверждение верно при задании размерности задачи и параметров МРЧ на основе данных, полученных предлагаемым способом.

Для вариантов маршрута, связанных с огибанием зон, запрещенных для полета, и полетом в городской застройке, разброс времени решения задачи не превышает 6 % от среднего значения. Более значительный (41 % от среднего значения) разброс времени решения наблюдается для варианта полета с огибанием рельефа местности по сравнению с другими вариантами. Это связано с тем, что для данного варианта карты высот характерна достаточно сложная конфигурация рельефа местности, что по результатам предварительного решения задачи МДФР дает разброс в количестве ППМ от 7 до 11 и, как результат, — во времени решения МРЧ.

Использование МРЧ для уточнения маршрута движения ЛА позволяет сократить длину маршрута на 2–4% относительно опорного варианта, полученного МДФР, с обеспечением выполнения всех принятых ограничений.

Применение предлагаемого способа решения рассматриваемой задачи позволяет сформировать маршрут, имеющий длину на 3–13,8 % меньшую, чем маршрут, полученный при решении задачи той же размерности только МРЧ. Кроме того, наблюдается меньший разброс результатов — СКО длины маршрута в относительном выражении не превышает 3 % от среднего значения против 4–7% для результатов, полученных с применением только МРЧ.

Заключение. Предложенный способ решения рассмотренной задачи на основе комплексного применения метода динамики формирования рек и метода роя частиц позволяет получить рациональный вариант маршрута движения ЛА с учетом рельефа местности.

Предварительное решение задачи МДФР обеспечивает формирование опорного варианта маршрута движения ЛА с автоматическим определением числа ППМ и параметров МРЧ. Применение МРЧ для уточнения опорного решения формирует рациональный вариант маршрута движения ЛА с учетом всех ограничений, накладываемых на задачу, с обеспечением более стабильного и высокого по качеству результата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Моисеев В. С.* Динамика полета и управление беспилотными летательными аппаратами: Монография. Казань: РИЦ „Школа“, 2017. 416 с.
2. *Есиков О. В., Акиншин О. Н., Хомяков К. А., Агафонов Д. О.* Модели и алгоритмы имитации движения воздушных целей в тренажерных комплексах. Тула: ВСРОК, 2022. 115 с.
3. *Шпенст В. А., Морозова О. Ю., Белошицкий А. А.* Устройства для диагностики объектов электроэнергетики с помощью беспилотных авиационных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 6. С. 503–508.
4. *Васильченко А. С., Иванов М. С., Колмыков Г. Н.* Формирование маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов с учетом местоположения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 403–420. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10416.

5. Бортакoвский А. С., Урюпин И. В. Оптимизация маршрутов непрерывно-дискретного движения управляемых объектов при наличии препятствий // Тр. МАИ. 2020. № 113. С. 1–34. DOI: 10.34759/trd-2020-113-17.
6. Козуб А. Н., Кучеров Д. П. Интеграционный подход к задаче выбора маршрута группы БПЛА // Системы и средства искусственного интеллекта. 2013. № 4. С. 333–343.
7. Марусин В. С., Пономарев О. П., Столяров О. Г., Темеров О. П. Алгоритмы оптимизации маршрута полета летательного аппарата // Вестн. Концерна ВКО „Алмаз–Антей“. 2019. № 1. С. 98–104.
8. Яковлев К. С., Баскин Е. С., Андрейчук А. А. Метод автоматического планирования совокупности траекторий для навигации беспилотных транспортных средств // Управление большими системами. 2015. Вып. 58. С. 306–342.
9. Алилуева Н. В., Руденко Э. М. Задача маршрутизации беспилотных летательных аппаратов на графе реперных точек // I-methods. 2018. Т. 10, № 1. С. 5–18.
10. Жук А. А., Булойчик В. М., Акулич С. В. Планирование оптимального маршрута движения беспилотного летательного аппарата по критерию минимума общего расхода топлива // Системный анализ и прикладная информатика. 2022. № 3. С. 43–49.
11. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б., Нгуен Т. К., Фам К. Ф. Планирование маршрутов полета БПЛА в задачах группового патрулирования протяженных территорий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24, № 7. С. 374–381.
12. Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Нестеров А. А. Планирование маршрутов движения летательного аппарата с использованием гладких траекторий // Автометрия. 2017. Т. 53, № 1. С. 3–11.
13. Хачумов М. В. Планирование и моделирование траекторного движения летательного аппарата в сложных условиях // Искусственный интеллект и принятие решений. 2018. № 1. С. 3–11.
14. Есиков О. В., Данилов А. В., Земляничин М. С. Планирование маршрута движения летательного аппарата с применением многоагентных алгоритмов стохастического поиска решения // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 12. С. 156–159.
15. Есиков О. В., Акиншин Р. Н., Данилов А. В., Земляничин М. С. Решение задачи планирования маршрута движения летательного аппарата с учетом рельефа местности // Электронные информационные системы. 2023. № 1 (36). С. 17–26.
16. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: Учеб. пособие. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. 446 с.
17. Nikolos I. K., Valavanis K. P., Tsourveloudis N. C., Kostaras A. N. Evolutionary Algorithm Based Offline/Online Path Planner for UAV Navigation // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics. 2003. DOI: 10.1109/TSMCB.2002.804370.
18. Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Генетические алгоритмы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 320 с.
19. Eberhart R. C., Kennedy J. Particle swarm optimization // Proc. IEEE Intern. Conf. on Neural Networks. Piscataway, NJ. IEEE Service Center, 1995. P. 1942–1948.
20. Clerc M. Particle Swarm Optimization. Wiley-Interscience, 2006. 243 p.
21. Yesikov D. O., Ivutin A. N. Rational values of parameters of island genetic algorithms for the effective solution of problems of ensuring stability of functioning of the distributed information systems // 5th Mediterranean Conf. on Embedded Computing (MECO), 12–16 June, 2016. P. 309–312. DOI: 10.1109/MECO.2016.7525769.
22. Leguizamon G., Blum C., Alba E. Evolutionary computation // Handbook of approximation algorithms and metaheuristics; Ed. T. F. Gonzalez. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007. P. 372–386.
23. Rabanal P., Rodriguez I., Rubio F. Applying River Formation Dynamics to Solve NP-Complete Problems // Nature-Inspired Algorithms for Optimisation; Ed. R. Chiong. Springer-Berlin-Heidelberg, 2009. Vol. 193. P. 333–368.
24. Есиков О. В., Есиков Д. О., Акиншина Н. Ю. Общие принципы выбора параметров многоагентных алгоритмов стохастического поиска для решения отдельных задач дискретной оптимизации // Приборы и системы. Контроль, управление, диагностика. 2018. № 5. С. 47–56.
25. Yesikov O., Yesikov D., Rumiantsev V., Ivutin A. Procedure of Selecting Stochastic Search Multi-agent Algorithm Parameters by the Example of Solving Discrete Optimization Problems // 8th Mediterranean Conf. on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, June 10–15, 2019. DOI:10.1109/MECO.2019.8760067.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Олег Витальевич Есиков** — д-р техн. наук, профессор; Центральное конструкторское бюро аппаратуры, отдел перспективных разработок; заместитель начальника отдела; E-mail: eovmail@rambler.ru
- Дмитрий Олегович Есиков** — канд. техн. наук; Вымпелком-Информационные технологии; ст. архитектор; E-mail: mcgeen4@gmail.com
- Александр Владимирович Данилов** — филиал Военной академии материально-технического обеспечения, учебно-методический отдел, начальник отдела
- Максим Самюэльевич Земляницын** — студент; Тульский государственный университет, Институт прикладной математики и компьютерных наук

Поступила в редакцию 09.11.2023; одобрена после рецензирования 01.12.2023; принята к публикации 22.03.2024.

REFERENCES

- Moiseev V. S. *Dinamika poleta i upravleniye bespilotnymi letatel'nyimi apparatami* (Flight Dynamics and Control of Unmanned Aerial Vehicles), Kazan, 2017, 416 p. (in Russ.)
- Esikov O. V., Akinshin O. N., Khomyakov K. A., Agafonov D. O. *Modeli i algoritmy imitatsii dvizheniya vozdushnykh tseley v trenazhernykh kompleksakh* (Models and Algorithms for Simulating the Movement of Air Targets in Training Complexes), Tula, 2022, 115 p. (in Russ.)
- Shpenst V. A., Morozova O. Yu., Beloshitsky A. A. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 6, pp. 503–508. (in Russ.)
- Vasilchenko A. S., Ivanov M. S., Kolmykov G. N. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 403–420, DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10416. (in Russ.)
- Bortakovskii A., Uryupin I. *Trudy MAI*, 2020, no. 113, DOI: 10.34759/trd-2020-113-17. (in Russ.)
- Kozub A. N., Kucherov D. P. *Sistemy i sredstva iskusstvennogo intellekta*, 2013, no. 4, pp. 333–343 (in Russ.)
- Marusin V. S., Ponomarev O. P., Stolyarov O. G., Temerov O. P. *Vestnik Kontserna VKO „Almaz-Antey“*, 2019, no. 1, pp. 98–104. (in Russ.)
- Yakovlev K. S., Baskin E. S., Andreychuk A. A. *Management of Large Systems*, 2015, no. 58, pp. 306–342. (in Russ.)
- Alilueva N. V., Rudenko E. M. *I-methods*, 2018, no. 1(10), pp. 5–18. (in Russ.)
- Zhuk A. A., Bulochyuk V. M., Akulich S. V. *System Analysis and Applied Information Science*, 2022, no. 3, pp. 43–49. (in Russ.)
- Filimonov A. B., Filimonov N. B., Nguyen T. K., Pham Q. P. *Mechatronics, Automation, Control*, 2023, no. 7(24), pp. 374–381. (in Russ.)
- Belokon' S. A., Zolotukhin Y. N., Nesterov A. A. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2017, no. 1(53), pp. 3–8.
- Khachumov M. V. *Artificial Intelligence and Decision Making*, 2018, no. 1, pp. 3–11. (in Russ.)
- Yesikov O. V., Danilov A. V., Zemlyanitsyn M. S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 12, pp. 156–159. (in Russ.)
- Yesikov O. V., Akinshin R. N., Danilov A. V., Zemlyanitsyn M. S. *Elektronnyye informatsionnyye sistemy*, 2023, no. 1(36), pp. 17–26. (in Russ.)
- Karpenko A. P. *Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy* (Modern Search Engine Optimization Algorithms. Algorithms Inspired by Nature), Moscow, 2017, 446 p. (in Russ.)
- Nikolos I. K., Valavanis K. P., Tsourveloudis N. C., Kostaras A. N. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics — part b: cybernetics*, 2003, DOI: 10.1109/TSMCB.2002.804370.
- Gladkov L. A., Kureichik V. V., Kureichik V. M. *Geneticheskiye algoritmy (Genetic Algorithms)*, Moscow, 2006, 320 p. (in Russ.)
- Eberhart R. C., Kennedy J. *Proc. IEEE Intern. Conf. on Neural Networks, Piscataway, IEEE Service Center*, 1995, no. 4, pp. 1942–1948.
- Clerc M. *Particle swarm optimization*, NJ, Wiley-Interscience, 2006, 243 p.
- Yesikov D. O., Ivutin A. N. *5th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, June 12–16, 2016, pp. 309–312, DOI: 10.1109/MECO.2016.7525769.
- Leguizamón G., Blum C., Alba E. *Handbook of approximation algorithms and metaheuristics*, Boca Raton, CRC press, 2007, pp. 372–386.
- Rabanal P., Rodriguez I. and Rubio F. *Nature-Inspired Algorithms for Optimisation*, vol. 193. Studies in Computational Intelligence, Springer, Berlin Heidelberg, 2009, pp. 333–368.
- Yesikov O. V., Yesikov D. O., Akinshina N. Yu. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2018, no. 5, pp. 47–56. (in Russ.)
- Yesikov O., Yesikov D., Rumiantsev V., Ivutin A. *8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, Budva, Montenegro, June 10–15, 2019, DOI:10.1109/MECO.2019.8760067.

DATA ON AUTHORS

- Oleg V. Yesikov** — Dr. Sci., Professor; Central Design Bureau of Apparatus Engineering, Department of Advanced Development; Deputy Head of the Department; E-mail: eovmail@rambler.ru
- Dmitry O. Yesikov** — PhD; VimpelCom–Information Technologies LLC; Senior Architect; E-mail: mcaeen4@gmail.com
- Alexander V. Danilov** — Branch of the Military Academy of Logistics, Educational and Methodological Department: Head of the Department
- Maksim S. Zemlyanitsyn** — Student; Tula State University, Institute of Applied Mathematics and Computer Sciences

Received 09.11.2023; approved after reviewing 01.12.2023; accepted for publication 22.03.2024.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО СИГНАЛА
ЧЕРЕЗ ЛОКАЛЬНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ СРЕДЫ****Д. Н. Кочурова*, А. И. Калугин, Е. А. Антонов, М. Ю. Альес***Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия*** darya310898@gmail.com*

Аннотация. Исследованы искажения пространственного и временного распределения плотности мощности лазерного импульса, вносимые средой распространения. Информация о таких изменениях необходима в задачах лазерной локации, в том числе для распознавания объекта. На основе разработанной программы решения уравнения переноса излучения методом характеристик для моделирования лазерного сигнала, прошедшего через атмосферу при наличии турбулентности, связанной с локальными природными и антропогенными явлениями, выявлено воздействие этих явлений на пространственную и временную форму лазерного импульса. Проанализированы результаты расчета влияния турбулентности на временную и пространственную формы сигнала. Определены явления, при которых происходит значительное искажение импульса лазерного излучения, падающего на объект, и установлено, что такие искажения могут приводить к ошибкам распознавания объекта в лазерных локационных системах.

Ключевые слова: *лазерный сигнал, метод характеристик, атмосфера, турбулентность, дальностный портрет, лазерная локация*

Ссылка для цитирования: *Кочурова Д. Н., Калугин А. И., Антонов Е. А., Альес М. Ю. Моделирование прохождения лазерного сигнала через локальные неоднородности среды // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 5. С. 406–416. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-406-416.*

MODELING OF LASER SIGNAL PROPAGATION THROUGH LOCAL INHOMOGENEITIES OF THE MEDIUM**D. N. Kochurova*, A. I. Kalugin, E. A. Antonov, M. Yu. Alies***Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS, Izhevsk, Russia*** darya310898@gmail.com*

Abstract. Distortions in the spatial and temporal distribution of laser pulse power density introduced by the propagation medium are studied. Information about such changes is necessary in laser ranging problems, including object recognition. Based on the developed program for solving the radiation transfer equation by the method of characteristics for modeling a laser signal propagation through the atmosphere in the presence of turbulence associated with local natural and anthropogenic phenomena, the impact of these phenomena on the spatial and temporal shape of the laser pulse are revealed. Results of calculating the influence of turbulence on the temporal and spatial shapes of the signal are analyzed. Phenomena are identified in which significant distortion of a laser pulse incident on an object occurs, and it has been established that such distortions can lead to errors in object recognition in laser ranging systems.

Keywords: *laser signal, method of characteristics, atmosphere, turbulence, long-range beam profile, laser location*

For citation: *Kochurova D. N., Kalugin A. I., Antonov E. A., Alies M. Yu. Modeling of laser signal propagation through local inhomogeneities of the medium. Journal of Instrument Engineering. 2024. Vol. 67, N 5. P. 406–416 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-406-416.*

Введение. Дальностный портрет (ДП) — электрический сигнал на выходе приемной системы лазерной локационной системы [1], который представляет собой зависимость принятой мощности сигнала от времени и при этом содержит информацию обо всех взаимодействиях лазерного начального импульса от момента посылы сигнала до его приема. Одна из важнейших задач лазерной локации — распознавание объекта, от которого отразился лазерный импульс. Восстановление формы поверхности объекта по его ДП является обратной задачей, которая не имеет строгого решения. Поэтому практически для определения типа объекта можно сопоставить эталонный ДП с сигналом, полученным локатором [2]. Однако реальный ДП объекта всегда искажен под воздействием неоднородностей среды распространения лазерного импульса. В этой связи логично первоначально решить сложную задачу восстановления истинного ДП объекта из полученного сигнала. Для этого необходимо знать, как влияют на сигнал те или иные внешние (среда распространения, ее состояние) и внутренние (начальные параметры лазерного сигнала, шумы передающей и приемной систем локатора) факторы.

Задача учета влияния внутренних факторов является решаемой, так как начальные характеристики обычно известны, стационарны и, следовательно, могут быть заложены в расчетную модель. Среда распространения (атмосфера) является менее контролируемой в связи с ее непостоянством. Параметры атмосферы зависят от высоты над уровнем моря, географического положения и сильно изменяются как при смене времен года, так и в течение суток. Кроме того, изменение скорости ветра и температурного поля приводит к локальным мелкомасштабным флуктуациям оптических свойств среды. Свойства атмосферы оказывают различное влияние на лазерный сигнал в пространстве (уширение пучка, смещение оси пучка от начального направления распространения, флуктуации распределения интенсивности) [3–5] и во времени (изменение формы импульса, его уширение и задержка) [6–8], также происходит ослабление амплитуды сигнала вследствие явлений поглощения и рассеяния. Все изменения в лазерном импульсе влияют на отраженный от объекта сигнал [9, 10], что может привести к невозможности распознавания объекта [11]. Однако до сих пор рассматривались только количественные характеристики лазерного пучка, тогда как полная зависимость распределения плотности мощности пучка во времени и пространстве никем не исследовалась. И следовательно, неизвестно, как искажения пучка средой распространения повлияют на возможность обнаружения и распознавания объектов.

Таким образом, существует необходимость в моделировании воздействия атмосферы на лазерный сигнал с целью имитирования различных природных и антропогенных явлений, которые могут оказать влияние на импульс излучения, падающего на объект. Для этого была разработана компьютерная программа, позволяющая моделировать пространственное и временное изменение импульса лазерного излучения, прошедшего атмосферу с локальными неоднородностями.

Методы моделирования. Под моделированием лазерного сигнала понимается получение данных о пространственном распределении интенсивности лазерного излучения в плоскости падения и о временной форме импульса, т. е. зависимости интенсивности от времени. Традиционно для моделирования лазерного сигнала, прошедшего через среду распространения, решается уравнение переноса излучения в стационарном приближении без учета рассеяния излучения. Известны разные методы численного решения уравнения переноса [12]. Одним из наиболее простых и эффективных является метод характеристик, где вдоль каждой характеристики (луча) решается обыкновенное дифференциальное уравнение [13]

$$\frac{dI(s, \omega)}{ds} + \sigma I(s, \omega) = \sigma I_0(s),$$

где s — параметр, характеризующий расстояние и рассчитываемый вдоль направления ω , I — интенсивность излучения, σ — коэффициент поглощения среды, I_0 — интенсивность равновесного излучения.

Модель атмосферы представляет собой неравномерную 3D-сетку, состоящую из параллелепипедов (ячеек) с различными оптическими свойствами. Считается, что во время распространения

лазерного импульса атмосфера остается постоянной (время изменения свойств атмосферы намного больше времени распространения излучения). Лазерное излучение представляется в виде набора лучей. В соответствии с указанным методом осуществляется трассировка лучей до достижения ими границы расчетной области. Лазерный луч на своем пути встречает ячейку атмосферы, преломляется, проходит сквозь нее и одновременно ослабляется. Так происходит последовательное преломление и ослабление луча на границах ячеек, пока луч не достигнет плоскости наблюдения. Таким образом, в плоскости наблюдения формируется набор точек пересечения лучей с этой плоскостью, т. е. определяется пространственное распределение интенсивности.

В плоскости наблюдения расположен приемник излучения, характеризующийся положением, собственной геометрией, полем зрения. Примем, что приемник выдает интегральные значения мощности лазерного излучения через промежутки времени, называемые временем записи приемника t_r . Для учета временной формы лазерного сигнала передаваемый импульс представляется в виде набора бесконечно коротких импульсов, огибающая которых имеет заданную форму. Расчет проводится для каждого отдельного бесконечно короткого импульса. Помимо интенсивности и направления, в каждой ячейке атмосферы рассчитывается также время прохождения луча сквозь эту ячейку. Времена достижения лучами плоскости наблюдения сортируются по возрастанию, после чего происходит последовательное суммирование интенсивностей тех лучей, которые достигли приемника в течение промежутков времени, равных времени t_r . Таким образом, определяется временная форма сигнала, поступающего на расчетную область, полученную при прохождении через среду начального бесконечно короткого импульса. Сформировав набор сигналов от всех бесконечно коротких импульсов, путем их суммирования получим итоговый лазерный сигнал импульса, прошедшего через неоднородную атмосферу.

Моделирование фотоприемного устройства. Для описания фотоприемного устройства необходимо знать: 1) его положение, т. е. координаты его центра в плоскости наблюдения, в расчетах принято, что центр фотоприемного устройства находится на оси z , тогда координаты — $(0, 0, z)$; 2) геометрию, т. е. форму и габаритные размеры, в данной работе для простоты принято, что размеры бесконечны; 3) поле зрения, которое ограничивает область пространства, откуда поступает излучение, в данной работе предполагается, что видна вся полусфера, т. е. поле зрения равно 2π ; 4) время записи t_r .

Моделирование лазерного сигнала. Моделирование пространственной формы. Гауссов пучок представляется в виде набора лучей. Начальное распределение лазерного излучения в плоскости выходного окна задается в виде распределенного набора точек, соответствующих начальным точкам распространения лазерных лучей. Ограничим область определения точек окружностью с радиусом w , равным энергетическому размеру пучка. В каждой точке задается следующая информация об исходящем луче: координаты начальной точки $a(a_x, a_y, 0)$, интенсивность луча I в точке, направление распространения луча. Направляющие вектора лучей определяются как

$$\mathbf{v} = \left(\frac{a_x}{w} \operatorname{tg} \theta, \frac{a_y}{w} \operatorname{tg} \theta, 1 \right), \quad (1)$$

где θ — энергетический угол расходимости лазерного излучения; интенсивность I в точке вычисляется согласно распределению Гаусса [14].

Задание начального распределения точек внутри области, ограниченной окружностью радиусом w , — важный шаг при моделировании. Рассмотрим три способа распределения точек в поперечном сечении пучка:

— точки расположены на концентрических окружностях, центры которых совпадают с центром пучка (способ № 1, рис. 1, *a*);

— точки расположены вдоль спирали Пифагора [15], при этом точки лежат в вершинах прилегающих друг к другу прямоугольных треугольников, один из катетов которых равен единице (способ № 2, рис. 1, *б*);

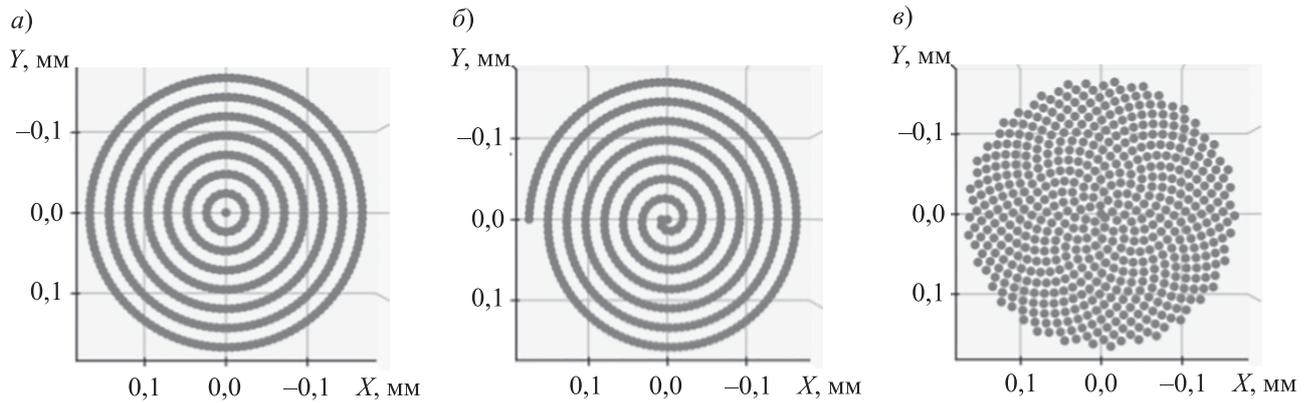


Рис. 1

— распределение точек — „угловая“ спираль [16], где новая точка образуется из предыдущей путем поворота на определенный угол $\pi(3 - \sqrt{5})$ и одновременного увеличения радиального расстояния (способ № 3, рис. 1, в).

На рис. 2 представлены варианты пространственного распределения интенсивности лазерного излучения. При расположении точек по способу № 1 (рис. 2, а) интенсивность излучения в точках, лежащих на одной окружности, одинакова и скачком изменяется при переходе к другой окружности. В случае спирали Пифагора (рис. 2, б) интенсивность I также дискретно уменьшается с удалением точки от центра, но шаг изменения значительно меньше, чем в случае № 1. Однако в любом сечении пучка плоскостью, проходящей через его диаметр, точки по-прежнему сравнительно далеко друг от друга. При способе № 3 (рис. 2, в) точки расположены не с постоянным шагом, вследствие чего они более равномерно заполняют сечение пучка и скачки интенсивности между соседними точками заметно меньше.

Как показали расчеты, выбор способа начального распределения точек существенно влияет на временную форму сигнала. На рис. 3, где кривые 1, 2, 3 соответствуют способам № 1, 2, 3, приведены результаты моделирования временной формы лазерных импульсов, прошедших через 1 и 5 км (рис. 3, а, б соответственно) пустого пространства без атмосферы. Начальная временная форма импульсов длительностью 1 нс имеет колоколообразный гауссов вид, угол расходимости равен 20 мрад. Форма импульса, полученная при использовании способа № 1, заметно отличается от результатов, полученных при использовании „угловой“ спирали и спирали Пифагора. Это, очевидно, связано с тем, что лучи, исходящие из точек отдельной окружности, имеют одинаковый угол расходимости, и, следовательно, все они проходят одинаковые расстояния до плоскости наблюдения и достигают ее в одно и то же время: на плоскость наблюдения поступает дискретный набор последовательных импульсов излучения, сформированных лучами из точек окружностей, следующих друг за другом. Эта проблема проявляется более значительно с увеличением расходимости лазерного пучка или проходимой им дистанции.

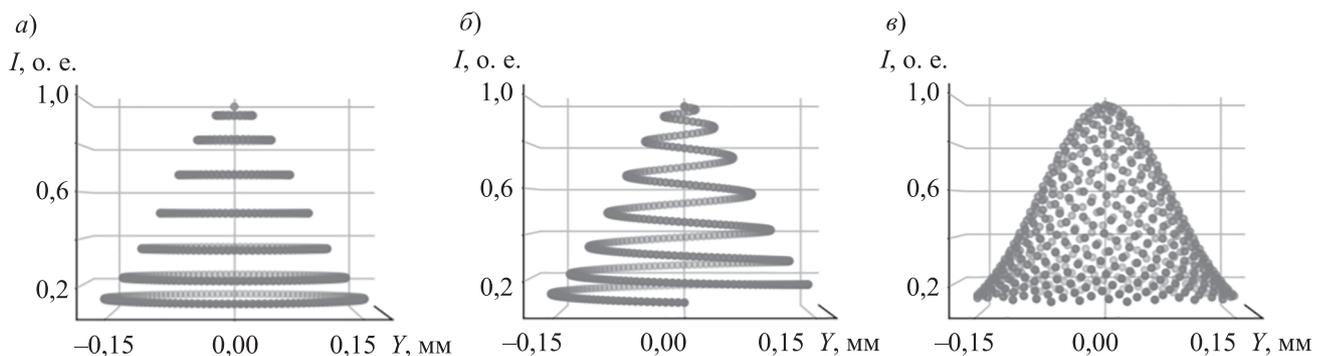


Рис. 2

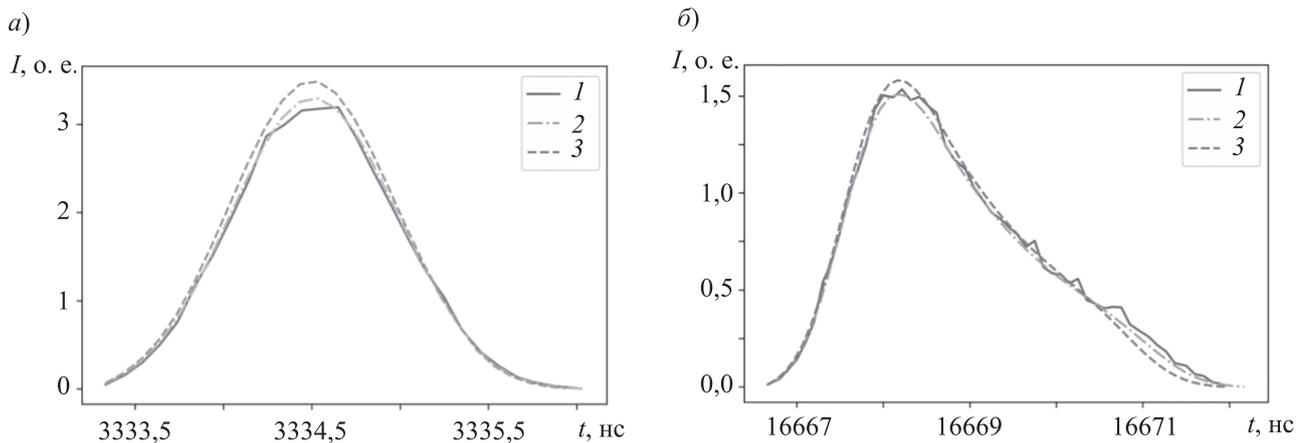


Рис. 3

При этом разница в амплитуде сигналов связана с небольшими различиями интенсивностей при разных способах начального распределения.

Согласно анализу, лучше всего воспроизводит временную зависимость сигнал, полученный в результате моделирования гауссова пучка с помощью спирали Пифагора. Это обусловлено тем, что точки равномерно отдаляются от центра, т. е. шаг при разном времени прихода лучей постоянен и количество лучей, приходящихся на одно время записи приемника, примерно постоянно. Однако распределение точек по спирали Пифагора плохо воспроизводит пространственное распределение гауссова пучка в поперечном сечении. Способ № 3 („угловая“ спираль) показывает равномерное распределение точек, что позволяет использовать меньшее их количество, и, следовательно, требуется меньше времени для расчета и получения достоверных результатов в отношении временной зависимости и пространственного распределения интенсивности. Поэтому „угловая“ спираль является оптимальным способом выбора распределения стартового положения лучей.

Моделирование временной формы. Для описания начальной временной формы импульса использована гауссова форма:

$$I = \begin{cases} I_0 \exp\left(-\frac{2,7(t-t_{\text{имп}})^2}{t_{\text{имп}}^2}\right) & \text{при } 0 < t < 2t_{\text{имп}}; \\ 0 & \text{при } t > 2t_{\text{имп}}, \end{cases} \quad (2)$$

где $t_{\text{имп}}$ — длительность импульса.

Для математического описания временной зависимости необходимо три основных параметра: максимальная амплитуда импульса, длительность импульса, шаг дискретизации. Шаг дискретизации может быть как постоянным, так и меняться на разных временных участках. В данной работе шаг дискретизации принят постоянным на всем временном интервале.

Моделирование атмосферы. Участок атмосферы представляет собой параллелепипед в области пространства таких размеров, чтобы можно было пренебречь краевыми эффектами в области распространения лазерного пучка. Атмосфера является колмогоровской [17]. При этом наименьший размер неоднородностей равен $\sim 1-10$ мм, т. е. намного больше длины волны. Это позволяет оставаться в рамках геометрической оптики. Также предполагается, что изменения структуры и состава атмосферы происходят намного медленнее, чем время распространения импульса. В этом случае можно считать атмосферу стационарной.

Выбранное пространство делится на слои вдоль оси распространения излучения. Затем каждый слой дробится по двум оставшимся осям, чтобы получились параллелепипеды (ячейки) заданных конкретных размеров. Внутри каждой из таких ячеек физические параметры атмосферы (показатель преломления, коэффициент поглощения, температура, давление, состав воздуха)

можно считать постоянными. Размеры ячеек определяются внутренним l_0 и внешним L_0 масштабом турбулентности. Показатель преломления в ячейке задается исходя из выражения [17]

$$\langle (n_0(q+1) - n_0(q))^2 \rangle = C_n^2 l^{2/3}, \quad (3)$$

где $n_0(q)$ — показатель преломления в ячейке q , C_n^2 — структурная характеристика показателя преломления, l — расстояние между центрами ячеек атмосферы.

Граничное значение показателя преломления равно 1,0002733 [18]. Структурная характеристика показателя преломления задается согласно выражению [19]

$$C_n^2 = 2 \langle \delta n_0^2 \rangle L_0^{-2/3}, \quad (4)$$

где $\langle \delta n_0^2 \rangle$ — дисперсия флуктуаций показателя преломления воздуха ($\sim 10^{-12}$).

Малые значения $\langle \delta n_0^2 \rangle$ приводят к слабому отражению на границах турбулентных неоднородностей, и, следовательно, в приземном слое атмосферы рассеянное излучение будет на порядки слабее основного сигнала, что позволяет пренебречь рассеянием. Наибольшего значения может достигать лишь помеха обратного рассеяния [20], возникающая на первых метрах прохождения излучения. Однако она легко отсекается от основного сигнала. При значительных изменениях показателя преломления (туман, дым) отраженный от неоднородности сигнал направлен в противоположную от объекта сторону и не влияет на форму отраженного от объекта сигнала (поэтому в данной работе не рассматривается).

Разработанная программа позволяет в любое место пространства вносить локальные турбулентности (такие как дым от костра), изменяя показатели преломления и коэффициенты поглощения и ослабления атмосферы в соответствующих ячейках.

Результаты моделирования. При моделировании использовались следующие параметры: пространственное распределение интенсивности задавалось по способу № 3 („угловая“ спираль из 4056 лучей), начальная зависимость интенсивности импульса от времени имеет гауссову форму длительностью 1 нс, длина волны 1064 нм, радиус гауссова пучка в перетяжке 500 мкм, положение перетяжки совпадает с положением источника излучения, ослабление в ячейке задается случайным числом в диапазоне $(0, 1 - 1) \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, внутренний масштаб турбулентности $l_0 = 1 \text{ мм}$. Выбранные коэффициенты ослабления соответствуют метеорологической дальности видимости от 10 ($1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$) до 45 км ($0,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$), т. е. от слабой дымки до ясной погоды [20]. Внешний масштаб турбулентности вычисляется согласно формуле (4). Плоскость наблюдения находится на расстоянии 1 км от выходного окна лазера, излучение распространяется параллельно поверхности земли.

Моделирование прохождения лазерного импульса через турбулентную атмосферу. На рис. 4 представлены результаты моделирования пространственного распределения мощности лазерного сигнала, прошедшего через турбулентную атмосферу при двух режимах турбулентности: *a* — сильная: $C_n = 10^{-6} \text{ м}^{-1/3}$, $L_0 = 2,64 \text{ м}$, *б* — средняя: $C_n = 10^{-7} \text{ м}^{-1/3}$, $L_0 = 2640 \text{ м}$. Результаты моделирования для случая слабой турбулентности ($C_n = 10^{-8} \text{ м}^{-1/3}$, $L_0 = 2640 \text{ км}$) совпадают с результатами для режима средней турбулентности. Анализ рисунка показывает изменения в пространственном распределении интенсивности для режима сильной турбулентности: некоторые точки выходят за границу пятна круглой формы (выделенные направления разброса точек обусловлены выбором формы распределения участков с турбулентностью). При этом основная часть (95 %), так же как и при режимах слабой и средней турбулентности, сосредоточена в круглом пятне радиусом $\approx 0,5 \text{ м}$. Лучи, достигшие плоскости наблюдения вне этого пятна, немногочисленны и достигают ее в различное время, что в итоге слабо влияет на временную форму импульса. Таким образом, временная зависимость сигнала при любых величинах турбулентности меняется незначительно, она сохраняет гауссову форму и длительность 1 нс.

Моделирование прохождения лазерного импульса через атмосферу с задымленным участком. Параметры пучка соответствуют вышеприведенным, $L_0 = 2640 \text{ м}$, $C_n = 10^{-7} \text{ м}^{-1/3}$.

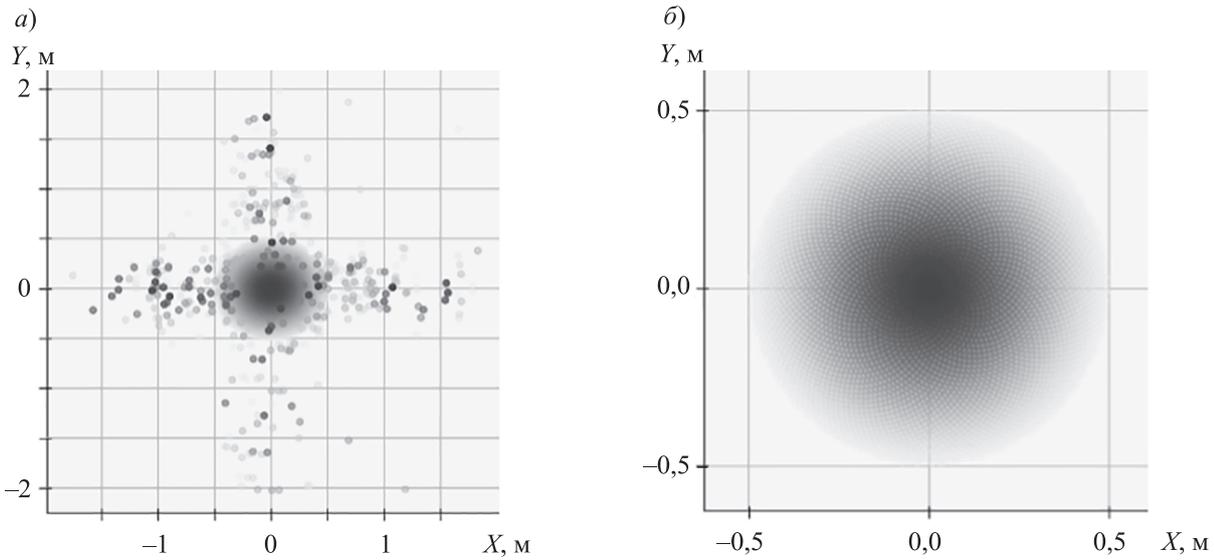


Рис. 4

Задымленный участок имеет форму параллелепипеда (рис. 5: 1 — лазерный пучок, 2 — область дыма, внизу приведены профили показателя преломления) и характеризуется следующими параметрами: высота вдоль оси y намного больше радиуса пучка; протяженность вдоль направления распространения — L_z , положение по оси z начала задымленного участка — p_z ; ширина вдоль оси x — L_x , положение центра вдоль оси x — p_x ; показатель преломления $n = 1,5$ [21]; коэффициент ослабления σ . Примем, что размеры задымленного участка вдоль оси x меньше размеров лазерного пучка или одного порядка с ним. Начальные параметры области дыма: $p_z = 500$ м, $L_z = 0,2$ м, $p_x = -0,05$ м, $L_x = 0,2$ м. Радиус лазерного пучка на расстоянии p_z составляет примерно 0,25 м.

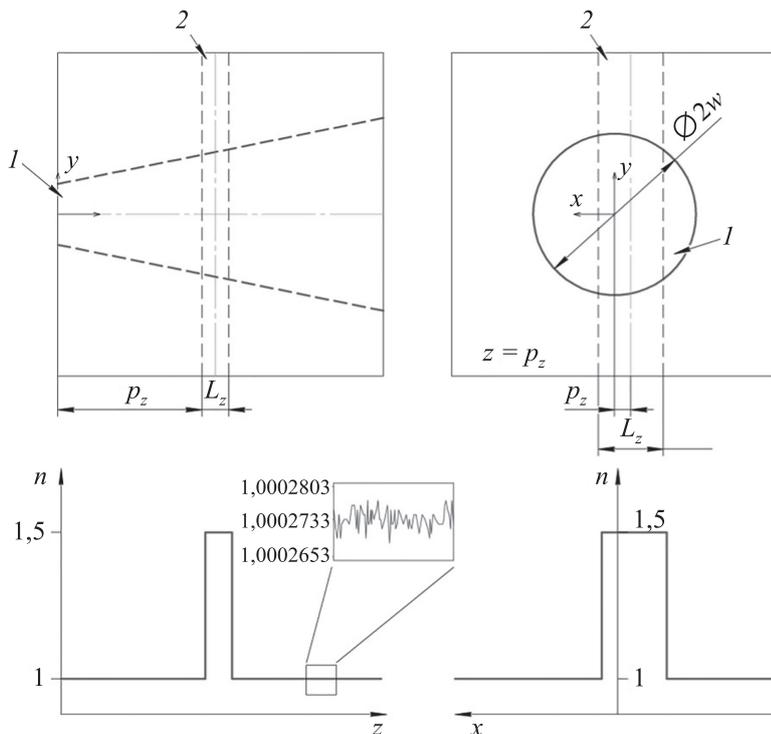


Рис. 5

Результаты моделирования пространственного распределения интенсивности пучка после прохождения им области дыма при трех значениях коэффициента ослабления σ представлены на рис. 6, где 1 — $\sigma_1 = 2,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, 2 — $\sigma_2 = 2,17 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$, 3 — $\sigma_3 = 2,17 \cdot 10^{-1} \text{ м}^{-1}$. Значение σ_1 соответствует метеорологической дальности видимости 6 км (слабая дымка), а значение σ_3 — 16 м (очень сильный туман или средней интенсивности дым) [20]. Только в случае 3 при относительно значительном ослаблении наблюдается небольшой скачок в пространственном распределении интенсивности. Ослабление части пучка, проходящего через задымленный участок, более сильное, из-за чего возникает резкое изменение значений интенсивности.

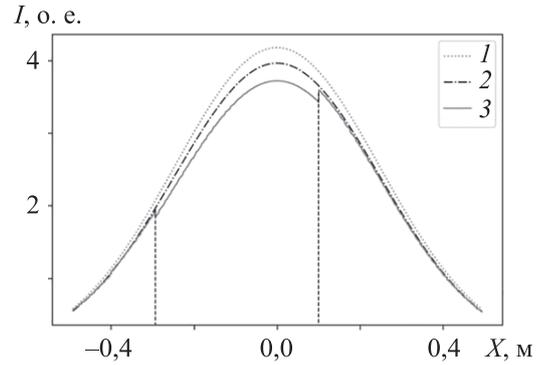


Рис. 6

Результаты моделирования временной формы импульса в зависимости от протяженности L_z задымленного участка при $\sigma = 2,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ представлены на рис. 7, где 1 — $L_z = 0,2 \text{ м}$, 2 — $L_z = 0,5 \text{ м}$, 3 — $L_z = 1 \text{ м}$, 4 — $L_z = 2 \text{ м}$. При малых L_z влияние задымленного участка сводится к уменьшению интенсивности излучения. При увеличении L_z наблюдаются качественные изменения сигнала, который уширяется и утрачивает гауссову форму (кривая 2). Затем происходит постепенное разделение одного импульса на два, которые имеют форму, близкую к форме начального импульса (гауссову, длительность 1 нс). Очевидно, данное изменение обусловлено тем, что часть пучка проходит участок, показатель преломления которого больше показателя преломления окружающей среды, и, следовательно, распространяется за более значительный временной промежуток, т. е. достигает плоскости наблюдения позже. Интервал между пиками разнесенных импульсов равен $t_d = L_z / c(n - n_0)$, где c — скорость света в вакууме, n_0 — средний показатель преломления окружающей среды.

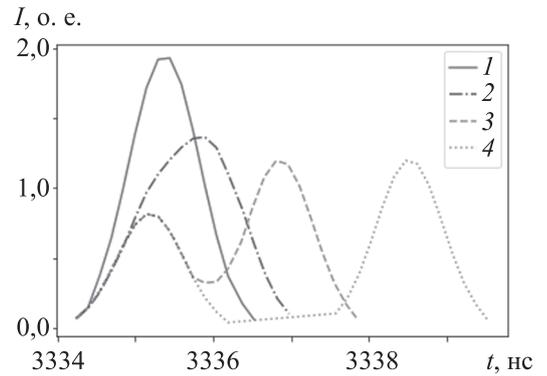


Рис. 7

Временная задержка части лазерного пучка приводит к изменениям в пространственном распределении лучей пучка в расчетной плоскости (плоскости зондируемого объекта). На объект будет падать не гауссов импульс с круглым поперечным сечением, а пучок с сечением более сложной формы. Более того, разделение исходного импульса на два снижает интенсивность падающего на объект излучения — это может привести к тому, что отраженный от объекта сигнал окажется слишком слабым для его регистрации приемником. С другой стороны, при достаточной интенсивности импульса возникают два отраженных сигнала, что приведет к обнаружению ложных объектов.

Рассмотрим также влияние положения области дыма относительно оси пучка на лазерный сигнал. Параметры области дыма такие же как и ранее, $L_z = 0,5 \text{ м}$. Результаты моделирования временной формы импульса в зависимости от положения области дыма p_x представлены на рис. 8, где 1 — $p_x = -0,15 \text{ м}$, 2 — $p_x = -0,05 \text{ м}$, 3 — $p_x = 0$, 4 — задымленный участок отсутствует. Поскольку при $p_x = -0,15 \text{ м}$ центральная часть пучка, имеющая наибольшую интенсивность, практически не пересекает область дыма, то эта центральная часть достигает плоскости

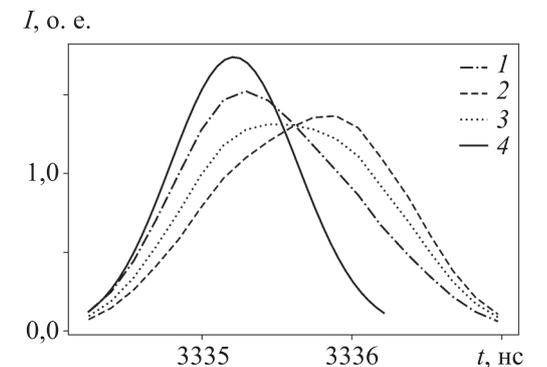


Рис. 8

наблюдения раньше остальной части пучка, ослабление которой более сильное (коэффициент ослабления области дыма больше коэффициента ослабления атмосферы в среднем в 10 раз). В результате временная зависимость интенсивности лазерного импульса в плоскости наблюдения принимает асимметричную форму. Максимум кривой 1 смещен в сторону большего значения t на 0,2 нс относительно максимума кривой 4. При приближении области дыма к центру пучка, в случае $p_x = -0,05$ м, центральная часть лазерного пучка также проходит через задымленную область, что приводит к увеличению времени достижения этой частью пучка плоскости наблюдения. В результате максимум временной зависимости интенсивности лазерного импульса — кривой 2 — смещается на 0,8 нс относительно положения 4. При совпадении центров задымленного участка и пучка кривая сигнала 3 становится симметричной, но длительность импульса возрастает в 2 раза по сравнению с кривой 4.

Моделирование прохождения лазерного импульса через протяженный задымленный участок. Если на пути распространения расходящегося пучка встретится протяженный участок с поперечными размерами, намного превышающими размер пучка, то вследствие преломления на границе раздела расходимость пучка уменьшится и, следовательно, уменьшится диаметр пучка в плоскости объекта. Кроме того, будет наблюдаться запаздывание импульса, но не изменение его пространственной и временной форм.

Результаты моделирования времени прихода импульса ($t_{пр}$) и максимальных радиусов пучка (w) в плоскости наблюдения представлены в таблице, начало задымленного участка находится на расстоянии $p_z = 500$ м от выходного окна лазера, расстояние до плоскости наблюдения $L = 1$ км. Время прихода импульса вычисляется по формуле $\frac{L - L_z}{c}n_0 - \frac{L_z}{c}n$.

L_z , м	0	0,1	2	10	100	500
w , мм	493,38	493,38	493,07	491,76	476,98	410,93
$t_{пр}$, нс	3334,25	3334,31	3337,48	3350,80	3500,72	4167,00

Заключение. С помощью разработанной авторами настоящей статьи программы моделирования прохождения лазерного импульса через турбулентную среду показано, что флуктуации показателя преломления, возникающие в атмосфере, слабо влияют на временное и пространственное распределение плотности мощности лазерного импульса даже при сильной турбулентности ($C_n = 10^{-6} \text{ м}^{-1/3}$). Однако при возможном наличии локальных неоднородностей (дым, туман) такие участки среды, даже сравнительно небольшой длины ($\sim 0,5$ м), с значительно отличающимся от среднего значения показателем преломления (более 10%) оказывают существенное влияние на временную форму сигнала. В этом случае может происходить как изменение формы импульса, так и его „расщепление“, что может приводить к потере сигнала или появлению ложных сигналов. На пространственное распределение интенсивности большое влияние оказывают сильно протяженные участки области тумана (протяженностью более 10 м). Расходимость пучка, проходящего через такой участок, уменьшается с 0,3 % при участке длиной 10 м до 17 % при 500 м, что приводит к другому соотношению его размера и размера объекта. Это также может привести к неправильному интерпретированию сигнала. Таким образом, в работе впервые определены степень и характер искажения сигнала в зависимости от размеров и величины неоднородностей атмосферы. Для правильной расшифровки лазерного локационного сигнала требуется учитывать искажения лазерного импульса, вносимые неоднородностями среды распространения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баулин Ф. Б., Бурый Е. В. Проблемы формирования систем, обеспечивающих автоматическое распознавание объектов по дальностным портретам // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43, № 1. С. 5–13. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-1-5-13.

2. Лабунец Л. В., Борзов А. Б., Ахметов И. М. Распознавание 3D объектов в однопозиционной системе лазерной локации методами интеллектуального анализа импульсных отражательных характеристик // Опт. журн. 2022. Т. 89, № 4. С. 40–51. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-04-40-51.
3. Hao Q., Cheng Y., Cao J., Zhang F., Zhang X., Yu H. Analytical and numerical approaches to study echo laser pulse profile affected by target and atmospheric turbulence // Opt. Express. 2016. Vol. 24, N 22. P. 25026. DOI: 10.1364/oe.24.025026.
4. Огнев Б. И., Складчиков С. А., Чуляева Е. Г. Влияние турбулентности на распространение оптических сигналов с длиной волны 1550 нм // Лазеры. Измерения. Информация. 2021. Т. 1, № 2. С. 12–16. DOI: 10.51639/2713-0568_2021_1_2_12.
5. Аксенов В. П., Дудоров В. В., Колосов В. В. Распределение вероятностей сильных флуктуаций интенсивности вихревых лазерных пучков в турбулентной атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 5, № 5. С. 7–10. DOI: 10.15372/aoo20180503.
6. Bouhadda M., Abbou F., Serhani M., Chaatit F., Abid A., Boutoulout A. Temporal pulse broadening due to dispersion and weak turbulence in FSO communications // Optik (Stuttg). 2020. Vol. 200. P. 163327. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.163327.
7. Банах В. А., Герасимова Л. О., Смалыхо И. Н. Численное исследование распространения короткоимпульсного лазерного излучения в турбулентной атмосфере // Квантовая электроника. 2015. Т. 45, № 3. С. 258–264.
8. Cai X., Ding L., Liu J., Liu L., Zhang K. Effect of atmospheric turbulence on laser radar // Proc. SPIE 4893, Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III, 2003. P. 362. DOI: 10.1117/12.466082.
9. Альес М. Ю., Калугин А. И., Кочурова Д. Н., Антонов Е. А., Трубицын В. Ю. Отражение лазерного излучения с гауссовым распределением интенсивности от шероховатой поверхности // Химическая физика и мезоскопия. 2022. Т. 4, № 24. С. 454–462. DOI: 10.15350/17270529.2022.4.36.
10. Xu X., Zhang H., Luo M., Tan Z., Zhang M., Yang H., Li Z. Research on target echo characteristics and ranging accuracy for laser radar // Infrared Phys. Technol. 2019. Vol. 96. P. 330–339. DOI: 10.1016/j.infrared.2018.12.003.
11. Li Y., Gao D., Liao H. Research on laser range profiles based on spatial domain // OSA Contin. 2020. Vol. 3, N 4. P. 1049–1057. DOI: 10.1364/OSAC.388418.
12. Цыбулин И. В., Скалько Ю. И., Павлова Е. С. Распределенный метод длинных характеристик для решения уравнения переноса // Тр. МФТИ. 2015. Т. 7, № 2. С. 51–59.
13. Методы решения уравнения переноса излучения для астрофизических моделей / М. П. Галанин, В. В. Лукин, В. М. Четчин. М., 2010. (Препринт / ИПМ им. М. В. Келдыша. № 59).
14. Возмищев И. Ю., Карайчев А. С., Шемякин В. Н. Модель лазерного излучателя для формирования опорного источника с супергауссовским распределением интенсивности // Тр. ежегодной НТК СПбНТОРЭС. 2020. Т. 1, № 75. С. 56–58.
15. Hahn H. K., Sachs R. The distribution of prime numbers on the square root spiral // arXiv: General Mathematics, 2008. P. 1–35. DOI: 10.48550/arXiv.0801.1441.
16. Vogel H. A better way to construct the sunflower head // Math. Biosci. 1979. Vol. 44, N 3–4. P. 179–189. DOI: 10.1016/0025-5564(79)90080-4.
17. Зуев В. Е., Банах В. А., Покасов В. В. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 269 с.
18. Mathar R. J. Refractive index of humid air in the infrared: model fits // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2007. Vol. 9, N 5. P. 470–476. DOI: 10.1088/1464-4258/9/5/008.
19. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1981. Т. 2. 322 с.
20. Козинцев В. И., Белов М. Л., Орлов В. М., Городничев В. А., Стрелков Б. В. Основы импульсной лазерной локации: Учеб. пособие / Под ред. В. Н. Рождествина. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 512 с.
21. Исаков А. А. Некоторые результаты исследований оптических и микрофизических характеристик дымов // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 1. С. 23–29.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дарья Николаевна Кочурова

— Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, лаборатория информационно-измерительных систем; мл. научный сотрудник; E-mail: darya310898@gmail.com

Алексей Игоревич Калугин

— канд. физ.-мат. наук; Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, лаборатория машинного обучения и обработки больших данных в производственных киберсистемах; ст. научный сотрудник; E-mail: ackad1976@yandex.ru

- Егор Александрович Антонов** — канд. физ.-мат. наук; Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, лаборатория машинного обучения и обработки больших данных в производственных киберсистемах; ст. научный сотрудник; E-mail: slick25@udman.ru
- Михаил Юрьевич Альес** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН; директор Центра; E-mail: aliesmy@mail.ru

Поступила в редакцию 07.11.2023; одобрена после рецензирования 09.01.2024; принята к публикации 22.03.2024.

REFERENCES

1. Baulin F. B., Buryi E. V. *Computer Optics*, 2019, no. 1(43), pp. 5–13, DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-1-5-13 (in Russ.).
2. Labunets L. V., Borzov A. B., Akhmetov I. M. *Opticheskii Zhurnal*, 2022, no. 4(89), pp. 40–51, DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-04-40-51 (in Russ.).
3. Hao Q., Cheng Y., Cao J., Zhang F., Zhang X., Yu H. *Opt. Express*, 2016, no. 22(24), pp. 25026, DOI:10.1364/oe.24.025026.
4. Ognev B. I., Skladchikov S. A., Chulyaeva E. G. *Lasers. Measurements. Information*, 2021, no. 2(1), pp. 12–16, DOI: 10.51639/2713-0568_2021_1_2_12 (in Russ.).
5. Aksenov V. P., Dudorov V. V., Kolosov V. V. *Optika Atmosfery i Okeana*, 2018, no. 5(31), pp. 349–354, DOI: 10.15372/AOO20180503 (in Russ.).
6. Bouhadda M., Abbou F., Serhani M., Chaatit F., Abid A. *Boutoulout. Optik (Stuttg)*, 2020, vol. 200, pp. 163327, DOI:10.1016/j.ijleo.2019.163327.
7. Banakh V. A., Gerasimova L. O., Smalikhov I. N. *Quantum Electron.*, 2015, no. 3(45), pp. 258–264, DOI 10.1070/QE2015v045n03ABEH015620.
8. Cai X., Ding L., Liu J., Liu L., Zhang K. *Proc. SPIE 4893, Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III*, 2003, pp. 362, DOI: 10.1117/12.466082.
9. Alies M. Yu., Kalugin A. I., Kochurova D. N., Antonov E. A., Trubitsin V. Yu. *Chemical physics and mesoscopy*, 2022, no. 4(24), pp. 454–462, DOI: 10.15350/17270529.2022.4.36 (in Russ.).
10. Xu X., Zhang H., Luo M., Tan Z., Zhang M., Yang H., Li Z. *Infrared Phys. Technol.*, 2019, vol. 96, pp. 330–339, DOI: 10.1016/j.infrared.2018.12.003.
11. Li Y., Gao D., Liao H. *OSA Contin.*, 2020, no. 4(3), pp. 1049–1057, DOI: 10.1364/OSAC.388418.
12. Tsybulin I. V., Skalko Yu. I., Pavlova E. S. *Proceedings of MIPT*, 2015, no. 2(7), p. 51–59. (in Russ.)
13. Galanin M. P., Lukin V. V., Chechetkin V. M. *Preprints of the Institute for Problems of Mathematics*, 2010, no. 59, 30 p. (in Russ.).
14. Vozmishchev I. Yu., Karaichev A. S., Shemyakin V. N. *Materialy 76-y Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Sankt-Peterburgskogo NTO RES im. A. S. Popova (Proceedings of the 76th Scientific and Technical Conference of the St. Petersburg Scientific and Technical Organization of the Distribution Zone named after. A. S. Popov)*, 2020, no. 75(1), pp. 56–58 (in Russ.).
15. Hahn H. K., Sachs R. *arXiv: General Mathematics*, 2008, 35 p., DOI: 10.48550/arXiv.0801.1441.
16. Vogel H. *Math. Biosci.*, 1979, no. 3(44), pp. 179–189, DOI: 10.1016/0025-5564(79)90080-4.
17. Zuev V. E., Banakh V. A., Pokasov V. V. *Optika turbulentnoj atmosfery (Optics of a Turbulent Atmosphere)*, Leningrad, 1988, 269 p. (in Russ.).
18. Mathar R. J. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2007, no. 5(9), pp. 470–476, DOI: 10.1088/1464-4258/9/5/008.
19. Ishimaru A. *Wave Propagation and Scattering in Random Media*, 1978.
20. Kozintsev V. I., Belov M. L., Orlov V. M., Gorodnichev V. A., Strelkov B. V. *Osnovy impul'snoj lazernoj lokacii (Fundamentals of Pulsed Laser Location)*, Moscow, 2006. 512 p. (in Russ.).
21. Isakov A. A. *Optika Atmosfery i Okeana*, 1999, no 1(12), pp. 23–29 (in Russ.).

DATA ON AUTHORS

- Darya N. Kochurova** — Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS, Laboratory of Information and Measuring Systems; Junior Researcher; E-mail: darya310898@gmail.com
- Alexey I. Kalugin** — PhD; Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS, Laboratory of Machine Learning and Processing of Big Data of Industrial Cyber Systems; Senior Researcher; E-mail: ackad1976@yandex.ru
- Egor A. Antonov** — PhD; Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS, Laboratory of Machine Learning and Processing of Big Data of Industrial Cyber Systems; Senior Researcher; E-mail: slick25@udman.ru
- Mikhail Yu. Alies** — Dr. Sci., Professor; Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS; Director of the Center; E-mail: aliesmy@mail.ru

Received 07.11.2023; approved after reviewing 09.01.2024; accepted for publication 22.03.2024.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП-РЕТРОФИТОВ В ТЕЧЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ****Н. П. Нестеркина¹, О. Ю. Коваленко¹, О. Е. Железникова¹, О. А. Колтаева¹,
Ю. А. Журавлева^{2,3*}**¹ *Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва,
Саранск, Россия*² *МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия*³ *Научно-исследовательский университет „МЭИ“, Москва, Россия** *ulypil@mail.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследований спектральных характеристик ламп-ретрофитов форм-фактора типа А60: коррелированной цветовой температуры и спектрального распределения плотности потока излучения в течение времени горения ламп. Проанализированы изменения спектральных характеристик исследуемых светодиодных ламп-ретрофитов в течение 6000 ч и определена доля синей составляющей исследуемых ламп. Измерения параметров ламп проведены с помощью фотоколориметрической измерительной установки при напряжении сети 220 В; при вычислении координат цветности и цветопередачи исследуемых ламп применен спектрорадиометрический метод. Результаты исследований показывают целесообразность замены традиционных ламп на светодиодные источники света с благоприятными для человека параметрами.

Ключевые слова: *светодиодная лампа, спектр излучения, срок службы, форм-фактор, цветовая температура*

Ссылка для цитирования: *Нестеркина Н. П., Коваленко О. Ю., Железникова О. Е., Колтаева О. А., Журавлева Ю. А. Исследование спектральных характеристик светодиодных ламп-ретрофитов в течение срока службы // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 5. С. 417–424. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-417-424.*

STUDY OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF LED RETROFIT LAMPS DURING THE SERVICE LIFE**N. P. Nesterkina¹, O. Yu. Kovalenko¹, O. E. Zheleznikova¹, O. A. Koltaeva¹, Yu. A. Zhuravleva^{2,3*}**¹ *Mordovia State University, Saransk, Russia*² *MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia*³ *National Research University „Moscow Power Engineering Institute“, Moscow, Russia** *ulypil@mail.ru*

Abstract. Presented results of studies of the spectral characteristics of retrofit lamps of the A60 type form factor include correlated color temperature and spectral distribution of radiation flux density during the burning time of the lamps. Changes in the spectral characteristics of the studied LED retrofit lamps are analyzed over a period of 6000 hours and the proportion of the blue component of the lamps under study is determined. Measurements of lamp parameters are carried out using a photocolormetric measuring setup at a network voltage of 220 V. When calculating the chromaticity coordinates and color rendition of the lamps under study, the spectroradiometric method is used. Research results show the feasibility of replacing traditional lamps by LED light sources with parameters favorable to humans.

Keywords: *LED lamp, emission spectrum, service life, form factor, color temperature*

For citation: *Nesterkina N. P., Kovalenko O. Yu., Zheleznikova O. E., Koltaeva O. A., Zhuravleva Yu. A. Study of spectral characteristics of LED retrofit lamps during the service life. Journal of Instrument Engineering. 2024. Vol. 67, N 5. P. 417–424 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-417-424*

Введение. Широкое использование светодиодных полупроводниковых источников света обусловлено их энергоэффективными характеристиками. Исследования по воздействию излучения источников света на зрительную работоспособность подтверждают благотворное влияние светодиодного освещения [1, 2]. К недостаткам светодиодного излучения на настоящий момент времени можно отнести большую составляющую синего цвета светодиодных источников света,

а исследования в медицинской области подтверждают факт разрушения мелатонина при интенсивном воздействии спектра синего цвета в диапазоне 430–470 нм. Проведенные российскими исследователями опыты [3] показали, что наиболее подавляющее воздействие на мелатонин выявлено при освещении источниками света с цветовой температурой 6400 К, в которых присутствует голубая составляющая спектра, в отличие от ламп с цветовой температурой 2700 и 4000 К. При определении влияния цветности излучения на мелатонин также установлено, что при длительном воздействии синего света у испытуемых повысился уровень тревожности, а биологические часы сдвинулись на 1,2 ч [4]. По данным SCHEER*, при нахождении испытуемых свыше 3 ч в помещении, которое освещается светодиодными источниками с синей составляющей излучения, наблюдается увеличение риска негативного воздействия фотохимических процессов на сетчатку глаза согласно установленным нормам Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений (ICNIRP) [5].

В работах [6–12] отражены результаты исследований характеристик светодиодных ламп для бытового освещения. Анализ исследований характеристик светодиодных ламп разной мощности в течение времени горения 3000 ч представлен в [13]. Однако согласно стандарту, измерения характеристик ламп целесообразно проводить при эксплуатации свыше 6000 ч, что и было сделано в данной работе.

Цель настоящей статьи — измерение и анализ изменения спектральных характеристик исследуемых светодиодных ламп-ретрофитов различных производителей в течение 6000 ч; определение на основе полученных результатов целесообразности использования данных ламп в качестве замены традиционным лампам накаливания; определение доли синей составляющей исследуемых ламп, способствующей подавлению мелатонина.

Материалы и методы. В качестве исследуемых ламп были отобраны производимые различными компаниями светодиодные лампы-ретрофиты со стандартным цоколем типа E27 различной цветовой температуры, с форм-фактором А60, близким к форм-фактору лампы накаливания. Внешний вид исследуемых ламп представлен на рис. 1. Световой поток и кривая силы света данных ламп отражены в работе [8].



Рис. 1

Измерения характеристик исследуемых ламп были выполнены в измерительно-исследовательской лаборатории Мордовского государственного университета (Саранск) [14] согласно ГОСТ IEC 62612–2019 и ГОСТ Р 55702–2013 с помощью фотоколориметрической измерительной установки производства компании „Gooch & Housego“ (Великобритания, США). Данная установка включает в себя прецизионный источник постоянного тока, арматуру (для крепления ламп), регулируемый (для изменения напряжения питающей сети) автотрансформатор, оптоволоконный кабель, фотометрический шар модели OL IS7600, многоканальный спектрорадиометр модели OL 770 UV/VIS и блок мультиметров UNI-T UTD890D (рис. 2). Технические характери-

* Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER) — Научный комитет по рискам для здоровья и окружающей среды.

стики комплектующих фотоизмерительной установки и принцип ее действия подробно описаны в документации.*

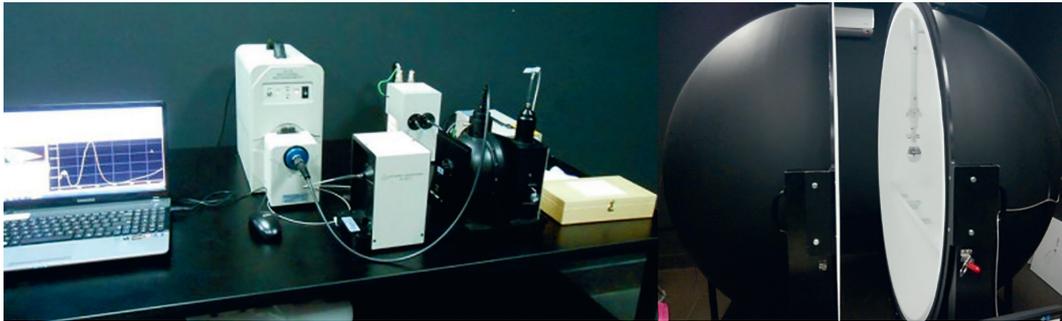


Рис. 2

Спектральные и цветовые характеристики ламп измерялись при номинальном режиме в течение 6000 ч горения с интервалом каждые 1000 ч при напряжении сети 220 В. В ходе исследования лампы выключались 4 раза в сутки и повторное включение осуществлялось не менее, чем через 15 мин после выключения. При вычислении координат цветности и цветопередачи исследуемых ламп применен спектрометрический метод.

Результаты исследований. Результаты измерения спектральных и цветовых характеристик исследуемых светодиодных ламп-ретрофитов, а также параметры данных ламп, заявленные производителем, представлены в табл. 1 (здесь $T_{\text{цв}}$ — коррелированная цветовая температура, λ_{max} — доминирующая длина волны).

В табл. 2 представлены результаты изменения спектральных характеристик исследуемых ламп в процессе горения.

Измерение спектрального распределения плотности потока излучения исследуемых ламп выполнялось с помощью спектро-радиометра типа OL 770 VIS/NIR (рис. 3). Измерения проводились после каждых 1000 ч горения в течение 6000 ч.

Перед измерением лампы отжигались при номинальном напряжении в течение не менее 15 мин согласно ГОСТ IES 62216–2019 до момента достижения тепловой стабильности.

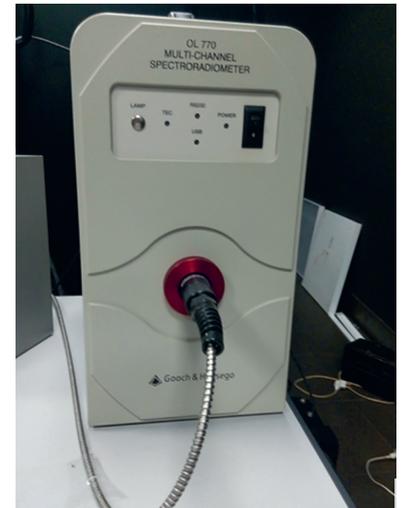


Рис. 3

Таблица 1

Название лампы	$T_{\text{цв}}$, К, заявленные/экспериментальные значения	Частота цвета	λ_{max} , нм	Координаты цветности, заявленные/экспериментальные значения			
				x	y	u	v
Uniel LED 10W 4000K	4000/4200	0,292	592	0,380/0,3808	0,380/0,3829	– / 0,2229	– / 0,3362
JazzWay PLED-SP 10W 5000K	5000/5250	0,064	453	0,346/0,3386	0,359/0,3496	– / 0,2079	– / 0,3217
Philips Essential LED 9W 6500K	6500/6740	0,072	448	0,313/0,3129	0,337/0,3297	– / 0,1977	– / 0,3125
Ecola Classic LED 10.2W 4000K	4000/3985	0,280	591	0,380/0,3803	0,380/0,3796	– / 0,2239	– / 0,3352
Wolta LX 12W 3000K	3000/2994	0,533	595	0,440/0,4362	0,403/0,4076	– / 0,2486	– / 0,3484

* Приложение к свид. № 64752 об утверждении типа средств измерений. Описание типа средства измерений. Установка фотоколориметрическая измерительная. М., 2017.

Таблица 2

Название лампы	Характеристика	Время горения, ч					
		0	1000	2000	3000	4000	6000
Uniel LED 10W 4000K	λ_{\max} , нм	592	592	594	595	597	599
	$T_{\text{цв}}$, К	4200	3800	4125	4120	4118	4121
JazzWay PLED-SP 10W 5000K	λ_{\max} , нм	453	451	451	450	449	448
	$T_{\text{цв}}$, К	5250	5260	5375	5334	5261	5228
Philips Essential LED 9W 6500K	λ_{\max} , нм	448	447	447	445	444	441
	$T_{\text{цв}}$, К	6740	6525	6500	6508	6510	6512
Ecola Classic LED 10.2W 4000K	λ_{\max} , нм	591	592	594	596	598	601
	$T_{\text{цв}}$, К	3985	3985	4190	4012	4018	4022
Wolta LX 12W 3000K	λ_{\max} , нм	595	595	596	597	598	602
	$T_{\text{цв}}$, К	2994	2997	3120	2998	3002	2995

Результаты представлены на рис. 4–6: рис. 4 — спектры излучения ламп Uniel LED 10W 4000K (а, б), JazzWay PLED-SP 10W 5000K (в, г), а, в — до начала испытаний, б, г — после 3000 ч горения; рис. 5 — спектры излучения ламп Philips Essential LED 9W 6500K (а, б), Ecola Classic LED 10.2W 4000K (в, г), а, в — до начала испытаний, б, г — после 3000 ч горения; рис. 6 — спектры излучения лампы Wolta LX 12W 3000K, а — до начала испытаний, б — после 3000 ч горения.

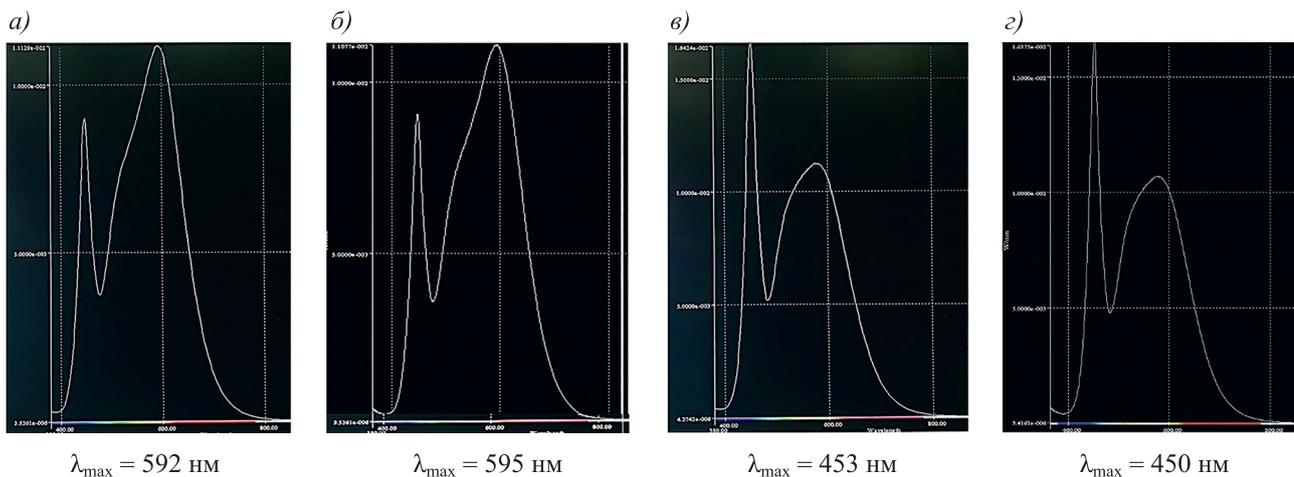


Рис. 4

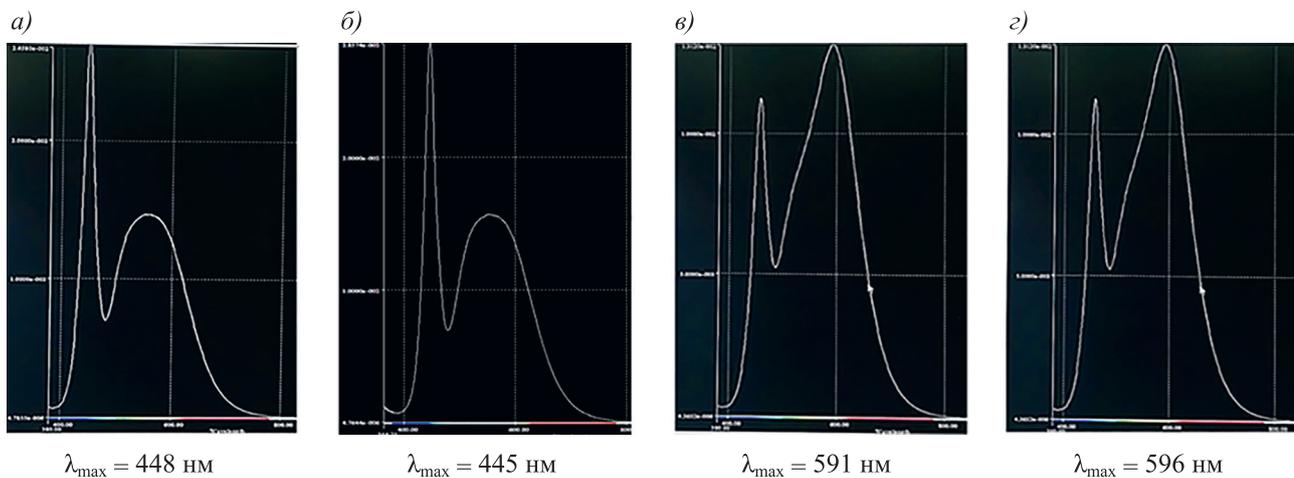


Рис. 5

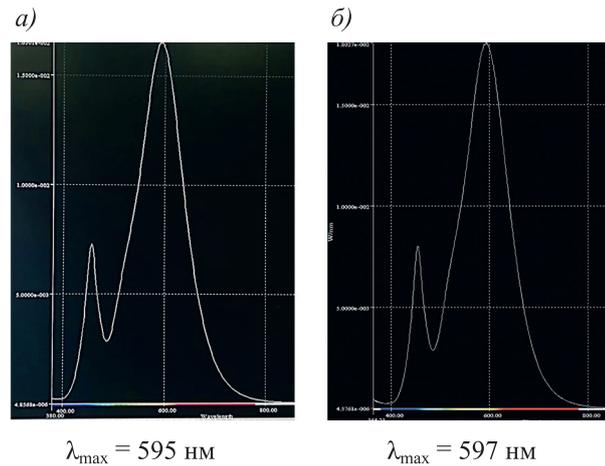


Рис. 6

Спектральное распределение интенсивности излучения (I) лампы накаливания мощностью 40 Вт, измеренное с помощью спектрорадиометра, показано на рис. 7. Спектр ламп накаливания непрерывен, в отличие от спектров светодиодных ламп-ретрофитов. Спектр смещен в красно-желтую область. Измеренная коррелированная цветовая температура $T_{\text{ЦВ}} = 2628$ К в отличие от исследуемых светодиодных ламп-ретрофитов, начальное значение $T_{\text{ЦВ}}$ которых составляет 6740, 5250, 4200, 3985, 2994 К.

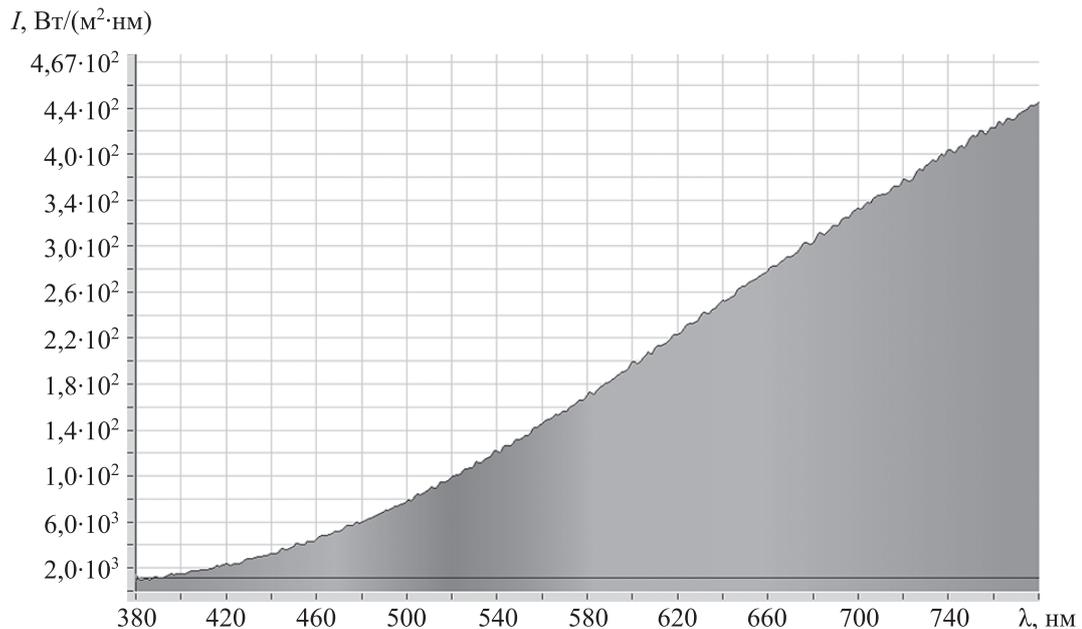


Рис. 7

Заключение. Анализ результатов сравнительных исследований светодиодных ламп показал следующее:

— в течение времени горения у ламп Uniel LED 10W 4000K, Ecola Classic LED 10.2W 4000K, Wolta LX 12W 3000K наблюдается смещение максимума спектральной плотности потока излучения в длинноволновую область спектра на 7, 10, 7 нм соответственно, у ламп JazzWay PLED-SP 10W 5000K, Philips Essential LED 9W 6500K, наоборот, — в коротковолновую область спектра на 5 и 3 нм соответственно;

— прослеживается уменьшение цветовой температуры ламп-ретрофитов Uniel LED 10W 4000K, JazzWay PLED-SP 10W 5000K, Philips Essential LED 9W 6500K на 1,9, 0,4 и 3,4 %

соответственно; цветовая температура лампы Ecola Classic LED 10.2W 4000K увеличивается на 0,9 %, цветовая температура лампы Wolta LX 12W 3000K практически не изменилась; изменение цветовой температуры сопровождается перераспределением спектрального излучения: увеличение цветовой температуры связано с увеличением доли коротковолновых излучений (фиолетового, голубого и синего цветов), а уменьшение — со смещением спектра в желто-оранжевую область.

Определение эффективной светло-голубой энергетической яркости источника производилось согласно ГОСТ Р МЭК/ТО 60825-9-2009.

Анализ результатов экспериментов показывает, что для исследованных ламп JazzWay PLED-SP 10W 5000K и Philips Essential LED 9W 6500K, имеющих большую составляющую синего излучения, продолжительность эксплуатации во включенном состоянии не должна превышать 2,8 ч, рекомендуется использовать их за несколько часов до сна в целях безопасности для глаз; для бытового освещения можно рекомендовать лампы Uniel LED 10W 4000K, Ecola Classic LED 10.2W 4000K, Wolta LX 12W 3000K.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамова Л. В., Михайлова Е. М., Пильщикова Ю. А., Дергачев Е. Е.* Исследование зрительного утомления в осветительных установках со светодиодами // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: Сб. науч. тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф. 2010. С. 27–29.
2. *Рябцева А. А., Зак П. П., Андрюхина А. С., Коврижкина А. А., Трофимова Н. Н., Андрюхина О. М., Лобанова В. Н.* Влияние спектрального состава искусственного освещения на остроту зрения лиц молодого возраста // Точка зрения. Восток—Запад. 2017. С. 117–120.
3. *Гизингер О., Осиков М., Телешева Л., Огнева О., Бокова О., Долин Е.* Влияние спектра излучения различных источников света на организм человека // Полупроводниковая светотехника. 2013. С. 50–52.
4. *Капцов В. А., Сосунов Н. Н., Шищенко И. И., Викторов В. С., Тулушев В. Н., Дейнего В. Н., Бухарева Е. А., Мурашова М. А., Шищенко А. А.* Функциональное состояние зрительного анализатора при использовании традиционных и светодиодных источников света // Гигиена и санитария. 2014. Т. 93, № 4. С. 120–123.
5. *Шмаров И. А., Бражникова Л. В., Соловьев А. К.* Безопасность применения светодиодного освещения по данным научного комитета Евросоюза и российских исследований // Технология текстильной промышленности. 2019. № 4 (382). С. 196–202.
6. *Журавлева Ю. А., Коваленко О. Ю., Микаева С. А., Атишев А. В., Немов В. В.* Исследование влияния форм-фактора светодиодных ламп для бытового освещения на их светотехнические характеристики // Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. № 6. С. 24–27.
7. *Lishik S. I., Posedko V. S., Trofimov Yu. V., Tsvirko V. I.* Current state, trends and perspectives of the development of light emitting diode technology // Light & Engineering. 2017. N 2. P. 13–21.
8. *Нестеркина Н. П., Кузнецов Е. А., Журавлева Ю. А.* Исследование изменений светотехнических характеристик светодиодных ламп ретрофитов в результате длительных испытаний // Вестн. МГТУ. Тр. Мурманск. гос. техн. ун-та. 2022. Т. 25, № 4. С. 305–312.
9. *Макарова Н. В., Ашратов А. А.* Исследование светотехнических характеристик светодиодных ламп-ретрофитов для бытового освещения // Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. № 3. С. 28–32.
10. *Nestyorkina N. P., Zhuravlyova Yu. A., Kovalenko O. Yu., Mikayeva S. A.* Comparative analysis of the characteristics of LED filament lamps for household lighting // Light & Engineering. 2020. Vol. 28, N 6. P. 71–75.
11. *Liu J., Xu C., Zheng H., Liu S.* Numerical analysis and optimization of thermal performance of LED filament light bulb // Proc. IEEE 67th Electronic Components and Technology Conf. (ECTC), Orlando, FL, USA. 2017. P. 2243–2248.
12. *Jie L., Jinglong Z., Sheng L.* Thermal Analysis and Optimization of LED Filament Lamp // Journal of Electronic Packaging. 2020. N 143. P. 19–26.
13. *Коваленко О. Ю., Журавлева Ю. А., Микаева С. А., Немов В. В.* Исследование изменения светотехнических характеристик полупроводниковых источников света различного конструктивного исполнения в процессе эксплуатации // Вестн. МГТУ. Тр. Мурманск. гос. техн. ун-та. 2019. Т. 22, № 4. С. 471–476.
14. http://www.mrsu.ru/ru/sci/labs.php?ELEMENT_ID=57865&sphrase_id=1149162.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Нина Петровна Нестеркина** — Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, Институт электроники и светотехники, кафедра светотехники; ст. преподаватель; E-mail: nesterkina.n@mail.ru
- Ольга Юрьевна Коваленко** — д-р техн. наук, доцент; Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, Институт электроники и светотехники, кафедра метрологии, стандартизации и сертификации; профессор; E-mail: crystal2000@mail.ru
- Ольга Евгеньевна Железникова** — канд. техн. наук, доцент; Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, Институт электроники и светотехники, кафедра светотехники; директор Института; E-mail: sarstf@mail.ru
- Оксана Алексеевна Колтаева** — магистрант; Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, Институт электроники и светотехники, кафедра светотехники; E-mail: koltaeva.o@yandex.ru
- Юлия Алексеевна Журавлева** — канд. техн. наук, доцент; МИРЭА — Российский технологический университет, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, кафедра электроники; Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова, кафедра светотехники; доцент; E-mail: ulypil@mail.ru

Поступила в редакцию 05.10.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 22.03.2024.

REFERENCES

1. Abramova L. V., Mikhailova E. M., Pilshchikova Yu. A., Dergachev E. E. *Problemy i perspektivy razvitiya otechestvennoy svetotekhniki, elektrotekhniki i energetiki (Problems and Prospects for the Development of Domestic Lighting, Electrical and Energy Engineering), Collection of Scientific Papers of the VIII International Scientific and Technical Conference*, 2010, pp. 27–29. (in Russ.)
2. Ryabtseva A., Zahk P., Andryukhina A., Kovrizhkina A., Trofimova N., Andryukhina O., Lobanova V. *Point of View. East–West*, 2017, no. 4, pp. 117–120. (in Russ.)
3. Giesinger O., Osikov M., Telesheva L., Ogneva O., Bokova O., Dolin E. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*, 2013, no. 6(26), pp. 50–52. (in Russ.)
4. Kaptsov V. A., Sosunov N. N., Shishchenko I. I., Viktorov V. S., Tulushev V. N., Deinego V. N., Bukhareva E. A., Murashova M. A., Shishchenko A. A. *Gigiyena i sanitariya*, 2014, no. 4(93), pp. 120–123. (in Russ.)
5. Shmarov I. A., Brazhnikova L. V., Solov'yev A. K. *Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, 2019, no. 4(382), pp. 196–202. (in Russ.)
6. Zhuravleva Yu. A., Kovalenko O. Yu., Mikaeva S. A., Atishev A. V., Nemov V. V. *Energobezopasnost' i energosberezheniye*, 2019, no. 6, pp. 24–27. (in Russ.)
7. Lishik S. I., Posedko V. S., Trofimov Yu. V., Tsvirko V. I. *Light & Engineering*, 2017, no. 2, pp. 13–21.
8. Nesterkina N. P., Kuznetsov E. A., Zhuravleva Yu. A. *Bulletin of the Murmansk State Technical University*, 2022, no. 4(25), pp. 305–312. (in Russ.)
9. Makarova N. V., Ashryatov A. A. *Energobezopasnost' i energosberezheniye*, 2019, no. 3, pp. 28–32. (in Russ.)
10. Nestyorkina N. P., Zhuravlyova Yu. A., Kovalenko O. Yu., Mikayeva S. A. *Light & Engineering*, 2020, no. 6(28), pp. 71–75.
11. Liu J., Xu C., Zheng H., Liu S. *IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, Orlando, FL, USA, 2017, pp. 2243–2248.
12. Jie L., Jinglong Z., Sheng L. *Journal of Electronic Packaging*, 2020, no. 143, pp. 19–26.
13. Kovalenko O. Yu., Zhuravleva Yu. A., Mikaeva S. A., Nemov V. V. *Proceedings of the Murmansk State Technical University*, 2019, no. 4(22), pp. 471–476. (in Russ.)
14. http://www.mrsu.ru/ru/sci/labs.php?ELEMENT_ID=57865&sphrase_id=1149162. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- Nina P. Nesterkina** — Mordovia State University, Institute of Electronics and Lighting Engineering, Department Lighting Engineering; Senior Lecturer; E-mail: nesterkina.n@mail.ru
- Olga Yu. Kovalenko** — Dr. Sci, Associate Professor; Mordovia State University, Institute of Electronics and Lighting Engineering, Department of Metrology, Standardization and Certification; Professor; E-mail: crystal2000@mail.ru

- Olga E. Zheleznikova** — PhD, Associate Professor; Mordovia State University, Institute of Electronics and Lighting Engineering, Department of Lighting Engineering; Director of the Institute; E-mail: sarstf@mail.ru
- Oksana A. Koltaeva** — Master Student; Mordovia State University, Institute of Electronics and Lighting Engineering, Department Lighting Engineering; E-mail: koltaeva.o@yandex.ru
- Julia A. Zhuravleva** — PhD, Associate Professor; MIREA — Russian Technological University, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, Department of Electronics; National Research University „Moscow Power Engineering Institute“, V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Department of Lighting Engineering; E-mail: ulypil@mail.ru

Received 05.10.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 22.03.2024.

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

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

УДК 535.34.083.2:538.56
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-425-434

ПРОТОЧНЫЙ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗАТОР ПРОТОННОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В СОСТАВЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Р. С. Кашаев*, Д. А. Нгуен, О. В. Козелков

*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия,
* kashaev2007@yandex.ru*

Аннотация. Приведено описание усовершенствованной конструкции проточного анализатора протонного магнитного резонанса (ПМР) для экспресс-контроля характеристик скважинной жидкости и нефти, а также новой технологии его применения при добыче нефти погружными центробежными насосами в структуре промышленного интернета вещей с краевой компьютерной обработкой на интеллектуальном цифровом нефтегазовом месторождении. Представлены результаты модернизации ПМР-анализатора, предназначенного для оперативного всеобъемлющего мониторинга и управления на цифровом месторождении и экспресс-контроля максимального числа характеристик продукции скважин с представительным пробоотбором. Приведены результаты работы: новая система пробоотбора, повышающая представительность отбора, и алгоритм функционирования ПМР-анализатора в структуре промышленного интернета вещей с компьютерной обработкой, что позволяет преодолеть ограничения, снизить стоимость операций, повысить достоверность данных и надежность работы оборудования. Рассмотрены преимущества метода ПМР-релаксометрии и приборов на его базе для контроля свойств жидкости и управления установками добычи и подготовки нефти.

Ключевые слова: экспресс-контроль, проточный, протонный, магнитный резонанс, промышленный интернет вещей

Ссылка для цитирования: Кашаев Р. С., Нгуен Д. А., Козелков О. В. Проточный экспресс-анализатор протонного магнитного резонанса в составе промышленного интернета вещей // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 5. С. 425–434. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-425-434.

FLOW-THROUGH EXPRESS ANALYZER OF PROTON MAGNETIC RESONANCE AS PART OF THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS

R. S. Kashaev*, D. A. Nguyen, O. V. Kozelkov

*Kazan State Energy University, Kazan, Russia
* kashaev2007@yandex.ru*

Abstract. A description is given of the improved design of a flow-through proton magnetic resonance (PMR) analyzer for express monitoring of well fluid and oil characteristics. A new technology for the analyzer application in oil production using submersible centrifugal pumps in the structure of the industrial Internet of things with edge computer processing in an intelligent digital oil and gas field is described. Presented results of the work include a new sampling system that increases the representativeness of the selection, and an algorithm for operation of PMR analyzer in the structure of the industrial Internet of things with computer processing, which allows to overcome limitations, reduce the cost of operations, increase the reliability of data and the reliability of equipment operation. The advantages of the PMR relaxometry method and devices based on it for monitoring the properties of liquids and controlling oil production and treatment plants are considered.

Keywords: express control, flow-through, proton, magnetic resonance, industrial Internet of things

For citation: Kashaev R. S., Nguyen D. A., Kozelkov O. V. Flow-through express analyzer of proton magnetic resonance as part of the industrial Internet of things. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 5. P. 425–434 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-425-434.

Введение. С переходом российской экономики на инновационный, цифровой путь развития на базе импортозамещающих отечественных разработок особую актуальность приобретает использование новых производственных технологий и новых роботизированных приборов и комплексов с улучшенными метрологическими характеристиками. Применение таких систем на интеллектуальных цифровых месторождениях (ЦМ — smart field) обеспечивает прирост добычи нефти на 10–25 %, снижение энергетических потерь до 8 % [1, 2], переход к новой стадии малодебитных скважин [3] и дает рост добычи тяжелой нефти с концентрацией воды более $W > 95$ %. Наряду с этим потенциалом нефтедобычи являются вязкие нефти, и Энергетической стратегией России на период до 2035 г. предусмотрено „создание инновационной системы энергетики с отечественными технологиями для энергетической безопасности страны, добычи тяжелой и высокообводненной нефти без иностранных технологий“.

Введение стандарта ПНСТ 360-2019* с требованием непрерывного контроля дебита, концентраций нефти, воды и газонасыщенности обусловило актуальность разработки инструментального оперативного средства и метода измерений.

Базовой основой структуры цифрового месторождения является сбор данных с их последующим анализом и управление процессами добычи, подготовки и транспортировки нефти, в том числе и через интернет вещей со всеобъемлющим контролем производственного оборудования и характеристик скважинной жидкости (СЖ). Однако проточный экспресс-контроль затруднен вследствие многообразия разнородных анализаторов и оборудования, часто рассеянных на обширных территориях и морских платформах, небезопасности функционирования зарубежного оборудования (были случаи отключения по сигналам со спутников), вариативности компонентов СЖ, агрессивности и взрывоопасности среды. Важно снизить погрешности используемых анализаторов, достигающие 15 % при измерениях и 30 % при пробоотборе [4], а также максимально расширить номенклатуру и диапазон измеряемых характеристик СЖ. Промышленный интернет вещей (ПИВ) позволяет преодолеть эти ограничения, связанные с организацией мониторинга и управления на адаптивной платформе технологического оборудования [5]. Опыт применения ПИВ с компьютерной краевой обработкой (КО) [6] показывает, что его использование обеспечивает снижение стоимости операций, децентрализацию, рост достоверности и надежности при автоматическом мониторинге и контроле.

Практически все технологии, в том числе добыча и подготовка нефти, изготовление и обработка химических и пищевых продуктов, включают в себя разнообразные формы многофазных потоков, которые могут быть расслоенными, волновыми, кольцевыми, пузырьковыми, эмульсионными. Это снижает достоверность измерений вследствие непредставительности пробоотбора, обусловленной формой потоков. Показатели работы скважин нестабильны [7] и могут резко (в течение нескольких часов) изменяться на 25–30 %. Поэтому необходим экспресс-контроль скважин по ПНСТ-360-2019.

На отечественных месторождениях вплоть до настоящего времени используются расходомеры и анализаторы, имеющие ряд недостатков: наличие движущихся деталей в турбинных и роторных расходомерах, влияние на точность и диапазон измерений инверсии фаз в водонефтяных эмульсиях во влагомерах на основе диэлектрической проницаемости, влияние пузырьков газа в ультразвуковых расходомерах, наличие радиоактивных гамма-источников (в зарубежных влагомерах и плотномерах). Подготовка нефти требует дорогостоящих и громоздких сепараторов нефти от газа, обслуживание которых требует, в свою очередь, высокого уровня подготовки

* Измерения количества добываемых из недр нефти и попутного нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования. М., Стандартинформ, 2019.

персонала. Эти традиционные решения не подходят для непрерывного автоматизированного мониторинга характеристик скважинной жидкости и нефти на ЦМ. Ответом отрасли стали многофазные анализаторы и расходомеры (в настоящее время свыше 2700 применений), позволяющие снизить расходы на счетчики и повысить мобильность систем, кроме того, их можно использовать на морских платформах и удаленных скважинах. За рубежом даже разработан специальный стандарт ASTM D 3764, обеспечивающий решение задач оптимизации добычи СЖ и предотвращения аварий, представительного пробоотбора СЖ и нефти, верификации показаний анализаторов — калибровки, настройки, обеспечения безопасности обслуживания посредством сети Интернет.

Метод ядерного (протонного) магнитного резонанса. Практически единственным методом для решения поставленных задач в комплексе является неконтактный, неразрушающий метод протонной магнитной резонансной (ПМР) релаксометрии, позволяющий с помощью единого анализатора (ПМРА) осуществлять многопараметрический многофазный экспресс-контроль характеристик СЖ и нефти по целому ряду ПМР-параметров, коррелирующих с характеристиками нефти и ее компонентов. ПМР-анализатор может управлять практически всеми процессами на нефтепромысле, поскольку пробоподготовка отсутствует, методические ошибки минимизируются посредством многократных усреднений при градуировках по стандартным образцам ВНИИМ им. Д. И. Менделеева и обработки данных с аппроксимацией кривых с высокими коэффициентами корреляций.

Технология ПМР-анализа позволяет по измерениям скоростей потоков фаз СЖ контролировать их дебит без остановок и нарушений производственных процессов, без износа движущихся деталей в агрессивной среде (с реагентами), как это осуществляется в стандартных расходомерах. Определение обводненности методом ПМР-релаксометрии уникально по диапазону 0–100 %, не используются датчики гамма-излучения, как в большинстве зарубежных анализаторов.

Возможности ПМР связаны с наличием магнитного момента μ у ядер водорода, присутствующих как в молекулах нефти, так и воды, при этом ПМР-параметры коррелируют с характеристиками нефти и ее компонентов. При помещении образца в постоянное магнитное поле B_0 и воздействии на магнитные моменты протонов переменным магнитным полем B_1 на частоте ν_0 (в герцах) или ω_0 (в радианах) магнитного резонанса (обычно в диапазоне $\nu_0 \sim 3 \dots 20$ МГц) поглощается электромагнитная энергия

$$\nu_0 = \gamma B_0 / 2\pi \quad \text{или} \quad \omega_0 = \gamma B_0, \quad (1)$$

где γ — гиромагнитное отношение ядра, в данном случае протона, которая регистрируется в катушке индуктивности датчика релаксометра ПМР. Это и есть явление ЯМР. Результаты измерений не зависят от состояния образца — расслоенного или однородного, непрозрачного или с механическими примесями и газом. Для метода ЯМР не требуются реактивы, объем образца обычно ≈ 15 –25 мл.

Однако отечественной промышленностью проточные, да и лабораторные ПМР-анализаторы не выпускаются. Зарубежная аппаратура ПМР имеет ограничения, связанные с недоступностью ее программного обеспечения для адаптации и модернизации, а также с дороговизной. Поэтому в нефтяной промышленности ПМР-анализаторы практически не применяются. Между тем метод ПМР-релаксометрия уже стал основой для таких официально утвержденных за рубежом методов, как измерение содержания водорода в топливах (ASTM D 1717), измерение содержания твердого жира SFC (ISO 8292), а также для отечественной методики определения масличности и влажности семян (ISO 10565) и вязкости тяжелой нефти в нефтяных кернах (РД 153-39.0-959-16).

В настоящей статье отражены результаты модернизации ПМР-анализатора и усовершенствования технологии непрерывного получения информации о характеристиках СЖ для управления ее добычей с использованием промышленного интернета вещей, позволяющего повысить

оперативность измерений и точность результатов и снизить риски аварий. Достижению результатов способствовали:

— разработанный мехатронный протонный магнитный резонансный анализатор четвертого поколения (ПМРА-IV) с представительным пробобором по ГОСТ Р 8.866-2015 для автоматизации добычи, подготовки и транспортировки нефти;

— разработанная методика экспресс-контроля всей номенклатуры характеристик потоков СЖ: скоростей v_i потоков отдельных фаз в трубе любого сечения S (т. е. расхода фаз Q_i , поскольку $Q_i = v_i S$), концентрации воды W и газонасыщенности G по ПНСТ-360-2019, плотности ρ , вязкости η , дисперсного распределения капель (D_i) воды или нефти в водных эмульсиях нефти, молекулярной массы, температуры застывания нефти и нефтепродуктов, концентраций асфальтено-смола, серы и парафинов, фракционного состава в нефти и концентраций солей и нефти в сточной воде и воде, закачиваемой в пласт для поддержания давления;

— внедрение анализатора ПМРА-IV в структуру ПИВ для управления промышленными процессами: добычи нефти электроцентробежными насосами; повышения качества нефти путем снижения ее вязкости и удаления воды и асфальтено-смола; подготовки топливных водонефтяных эмульсий на основе нефть-содержащих сточных вод и разливов нефти как альтернативы тяжелым топливам; автоматизированного контроля загрязненности сточных и поверхностных вод нефтью, нефтепродуктами и солями.

Методика измерения ПМР-параметров. При измерениях ПМР-параметров методом ПМР-релаксометрии целесообразно применять методику Карра — Парселла — Мейбум — Гилла [8] из серии $\pi/2$ - и π -импульсов $[(\pi/2) - \tau_0 - (\pi - 2\tau_0)_N - T]_n$, поворачивающих намагниченность спинов на 90 и 180° , где τ_0 — интервал между импульсами, N — число π -импульсов, T — период запуска серии, n — число накоплений. Схема, отображающая последовательность $\pi/2$ - и π -импульсов, приведена на рис. 1 [8].

Между π -импульсами образуются сигналы спин-эхо (СЭ), и если спиновая система состоит из ядер с отличающимися временами спин-спиновой релаксации T_{2i} нескольких фаз, то огибающая СЭ будет суперпозицией i экспонент согласно уравнению

$$A_e = \sum A_{0i} \exp(-t/T_{2i}). \quad (2)$$

Из огибающей СЭ в полулогарифмическом масштабе выделяются ПМР-параметры — амплитуды A_{0i} сигналов СЭ и времена T_{2i} ; индекс „ i “ относится к разным фазам, имеющим свои A_{0i} и T_{2i} . Система характеризуется также временами спин-решеточной релаксации T_{1i} (продольной вдоль оси B_0). Но в данной работе авторами используется величина T_{2i} , так как время ее измерения ($\approx 1,5$ мин) в десятки раз меньше времени T_{1i} . Кроме того, величина T_{2i} более чувствительна к медленным молекулярным движениям в ассоциатах в диссипативной системе нефтяных дисперсных систем [9].

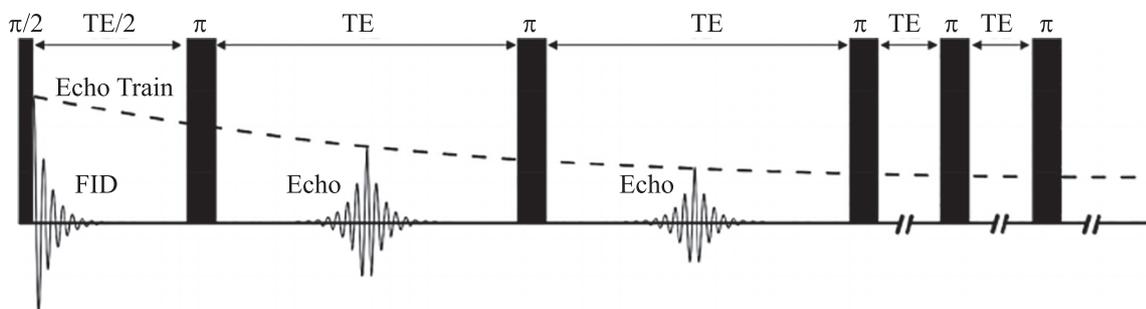


Рис. 1.

Усовершенствованный анализатор ПМРА-IV. За последние 30 лет авторами настоящей статьи были разработаны несколько вариантов (ПМРА-I-III) проточных ПМР-анализаторов [10,

11]. Последняя разработка — мехатронный экспресс-анализатор скважинной жидкости ПМРА-IV, структура, принцип работы и фотоизображения которого, а также таблица сравнения с аналогами приведены в [12]. Здесь опишем лишь усовершенствования системы представительного отбора пробы из емкости турбулентной гомогенизации СЖ.

Мехатронное устройство пробоотбора представляет собой комбинацию механических узлов, управляемых по сигналам микроконтроллера. Структурно-функциональная схема устройства представлена на рис. 2, где 1 — корпус патрубка, 2 — перемещающийся патрубок пробоотбора, 3 — электродвигатель СД-54, 4 — электронный блок управления, 5 — возбуждающий конденсатор, 6 — интегральная плата драйвера управления двигателем, 7 — шестерня, 8 — штифт, 9 — ходовой винт, 10 — энкодер, 11 — шатун.

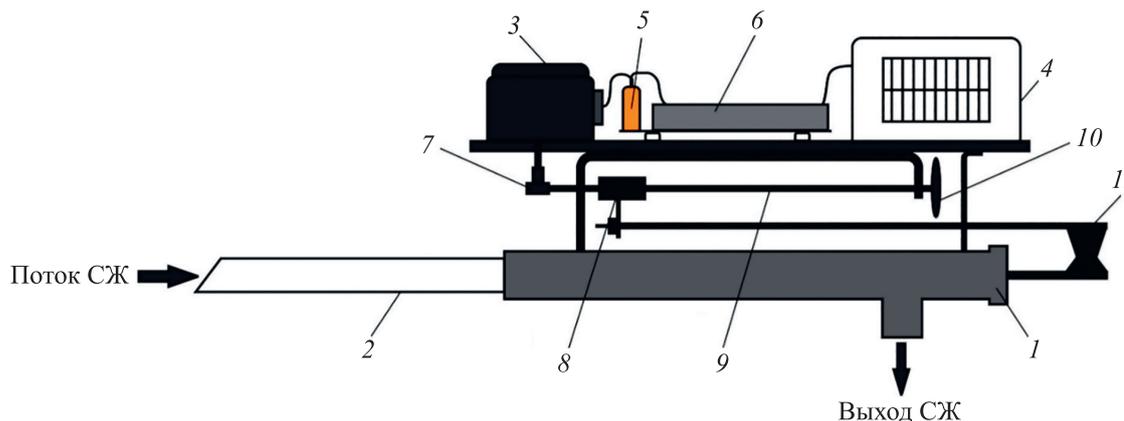


Рис. 2.

Мехатронная часть устройства установлена на алюминиевой опоре с монтажным кронштейном, на котором размещен электропривод с системой перемещения, позволяющей патрубку перемещаться в прямом и обратном направлениях. Тем самым создается перепад давлений жидкости между измерительной емкостью и входом патрубка, по которому проба поступает в катушку индуктивности датчика релаксометра ПМР. Запуск электропривода осуществляется однофазным синхронным электродвигателем СД-54 3 с редуктором. Дифференциальная шестерня 7 передает движение вала двигателя на приводной вал ходового винта 9 через штифт 8, установленный на приводном валу. Шестерня преобразует вращение ходового винта в возвратно-поступательное движение патрубка. На конце ходового винта закреплен медный диск с 25 прорезями и оптическим приемопередатчиком 10, образующий одноканальный энкодер, который предназначен для определения величины перемещения патрубка по числу оборотов диска. Основным компонентом блока управления 4 является микроконтроллер Atmel ATMEGA328, интегрированный в Arduino Nano. Пульт управления представляет собой клавиатуру с кнопками, подключенную к Arduino Nano для установки параметров и управления перемещением патрубка с помощью привода. Сигналы управления передаются на двигатель СД-54 через драйверы, состоящие из шести реле с двумя контактами. Реле изолированы от микроконтроллера с помощью оптоизоляции типа РС 817.

Рассмотренное мехатронное устройство реализует новую усовершенствованную систему пробоотбора, позволяющую повысить представительность отбора.

Следует отметить, что в последнее время появились публикации о разработках нескольких аналогичных усовершенствованному ПМРА-IV ПМР-анализаторов (см., например, [13–15]. Так, в [13] представлен многофазный поточный ЯМР-анализатор МРФМ фирмы „Krohn“ (Норвегия). В этом анализаторе применено предварительное намагничивание СЖ, и проанализировано его влияние на точность разделения ПМР-параметров фаз. В результате показано, что предварительное намагничивание существенно повышает намагниченности фаз нефти и воды, а также отношение сигнал/шум.

Структура промышленного интернета вещей с ПМР-анализатором. Интернет вещей (ИВ) объединяет цифровую среду данных с реальными объектами и позволяет создавать их цифровые двойники во многих сферах, в частности на интеллектуальных цифровых месторождениях для мониторинга давления и реле клапанов, уровня жидкости в танкерах, насосах, скважинах и др. [16]. Большинство реализаций интернета вещей централизованы, что является их слабым местом и может привести к потерям и авариям [17]. Поэтому желательна децентрализация системы для повышения достоверности и автономности мониторинга и управления, поскольку перерывы в операциях могут приводить к существенным потерям продукции и прибыли [18].

Промышленный интернет вещей, называемый также Индустрия 4.0, является расширением ИВ, оснащенным встроенными интеллектуальными датчиками, приводами и программным обеспечением для сбора, обработки и интерпретации информации в реальном времени без участия человека [19]. Физические компоненты с датчиками и приводами для краевой компьютерной обработки (КО) выбираются в зависимости от того, что надо контролировать — температуру, давление, влажность и др. ПИВ-КО определяет, как размещать и структурировать сетевые решения для любого промышленного применения.

С помощью баз данных ПИВ-КО можно точно описать, в частности, работу установки электроцентробежного насоса (УЭЦН), а именно данные по частоте вращения ротора, температуре погружного электродвигателя (ПЭД), входному и выходному давлению насоса и концентрации воды в СЖ. Насос должен работать в области между двумя граничными показателями расхода (дебита) — в рабочей зоне выше и ниже пределов напора. Основная проблема, определяемая операторами добычи нефти, — это экспресс-контроль параметров УЭЦН. Обычно при этом используются сети датчиков в системе SCADA, которая немасштабируема, закрыта и имеет высокую стоимость [6]. В SCADA-иситеме используются погружные датчики, что требует контроля их работоспособности и высоких затрат.

В этом плане перспективным является экспресс-контроль с помощью комплекса ПМРА-IV в структуре ПИВ-КО с использованием управляющих сигналов с данными о дебите, плотности и вязкости нефти. При этом нет необходимости размещения первичных датчиков в скважинах, что сопровождается сложностями по энергоснабжению и затратам, а также потерями напора.

Предложенная в [6] структура архитектуры ПИВ может быть разделена на три уровня: 1) устройства и установки, 2) ПИВ-КО, 3) мониторинг проекта в „облаке“.

— Уровень устройств и установок состоит из УЭЦН, датчиков температуры, давления, частоты и др., а также анализатора ПМРА-IV в устье скважины; этот уровень ответственен за бор физической и цифровой информации, а также передачу данных на верхний уровень для выполнения его команд.

— Уровень ПИВ-КО состоит из регулируемого по скорости привода электродвигателя с компьютерной системой хранения данных, связанного с ПИВ-КО через протокол Modbus и подсистему, которая содержит плату Raspberry Pi, плату интерфейса Modbus, MiFi и блок бесперебойного питания. Плата Raspberry Pi — основной системный контроллер с возможностью накопления и хранения данных. Плата Raspberry Pi 4 Model B имеет 1.5 GHz 64-битовый четырехядерный ARM Cortex-A72 процессор с WiFi, Bluetooth 5, гигабитный Ethernet, два USB2.0 порта, два USB 3.0 порта, 2 GB-хRAM. Питание платы Pi 4 осуществляется через USB-C порт. Система работает как ворота, соединяющие данный уровень с вышестоящими. ПИВ-КО принимает сигналы в реальном времени, включая данные о ПМР-параметрах анализатора. Данные и результаты анализа используются для предварительных действий и автоматических предупреждений, минимизирующих потери продуктивности УЭЦН.

— Уровень „облачного“ мониторинга состоит из серверов и системы контроля предприятия; он ответственен за мониторинг и контроль УЭЦН удаленно через промышленные пульта управления, размещенные в „облаке“ как система программированного контроля и принятия решений. Подсистема ПИВ-КО работает как ворота в облачную конфигурацию, адаптированную к операциям со средой с большими информационными пространствами.

Для безопасного и быстрого доступа к „облаку“ используется краевой анализ и компьютерная обработка с неопределенными множествами данных. Цель КО — ускорение анализа данных большого объема непосредственно в области их поступления с обеспечением быстрых действий в реальном времени. При КО осуществляется взаимодействие с зависимыми от времени переменными, а „облако“ используется для остальной обработки. На удаленных нефтегазовых месторождениях, при слабой или отсутствующей связи с центральным сайтом, КО предпочтительна из-за возможности скрытия [20].

Методология [6] ПИВ-КО отображена в виде представленной на рис. 3 децентрализованной платформы, характеризующей последовательность сбора и обработки данных. Все датчики ПИВ-КО, УЭЦН расположены в скважине у насоса, там же выполняется шаг 11; все приводы с датчиками и вход в ПИВ-КО расположены в преобразователе частоты (ПЧ) электродвигателя, шаги 1–4, 8–10 выполняются здесь же; на 9-м шаге осуществляется изменение момента M_c сопротивления на валу через ПЧ, изменение мощности ПЭД и добавление команд по прогнозам; канал 12 предназначен для передачи данных от ПМРА-IV в устье скважины.

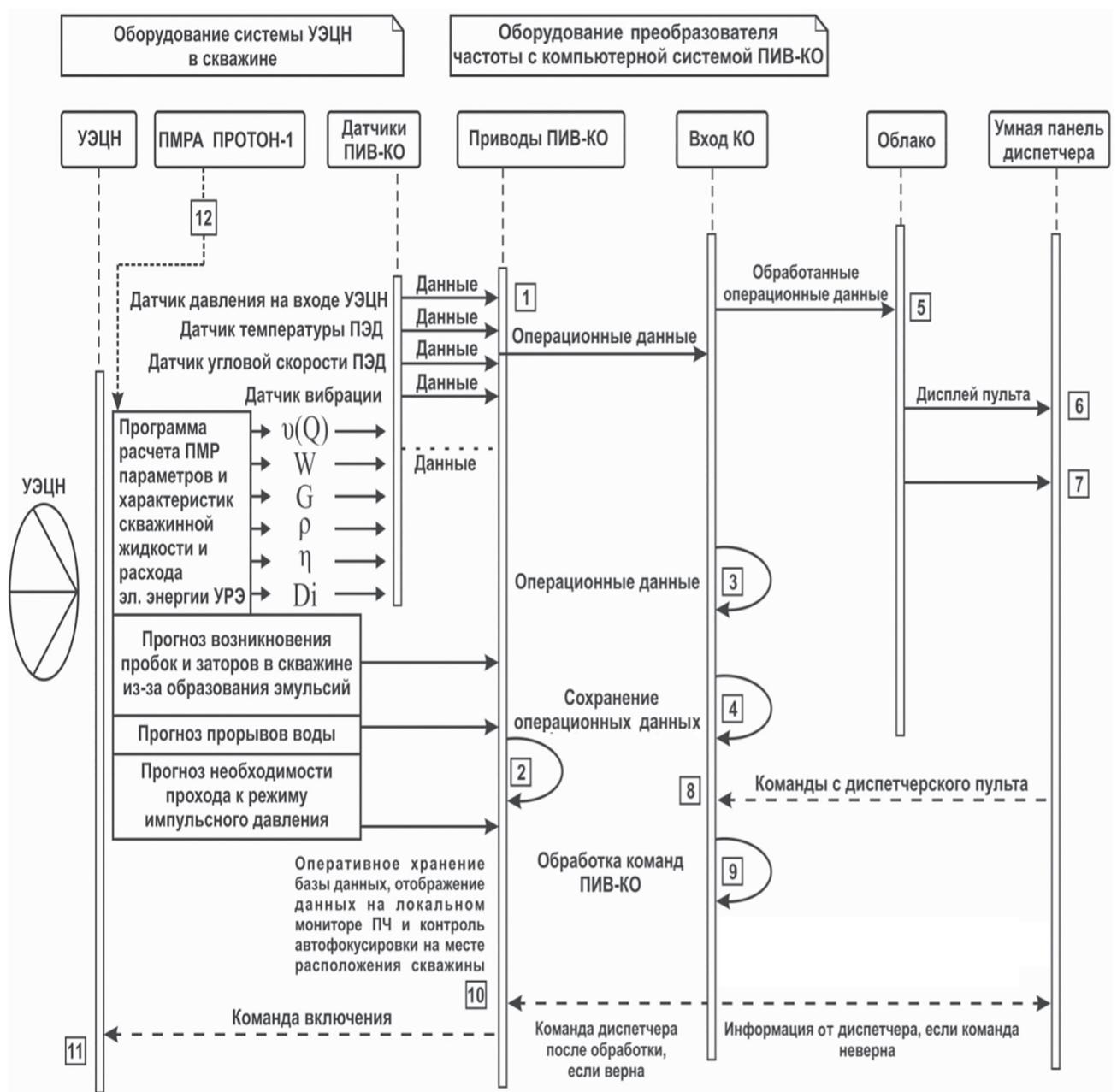


Рис. 3.

На дисплей выводится следующая информация:

- предварительные действия, которые требуют подтверждения пользователем;
- предварительные действия по поддержке состояния УЭЦН;
- действия по обратной связи с пользователем.

В таблице представлен сравнительный анализ систем мониторинга и контроля на нефтяном месторождении.

Характеристика	Система		
	SCADA	ИВ	ПИВ-КО
Децентрализация	Незначительная	Средняя	Высокая
Автоматический контроль и обработка данных в реальном времени	Низкая	Низкая	Высокая
Прозрачность и прослеживаемость данных и их передачи	Низкая	Средняя	Высокая
Стоимость операций	Высокая	Высокая	Низкая
Надежность платформы	Незначительная	Средняя	Высокая

Итак, ПИВ-КО в сочетании с ПМРА-IV — оптимальная система в ситуациях, когда надежность, всеобъемлющая наблюдаемость данных и безопасность превышают по значимости остальные параметры систем мониторинга.

Заключение. Низкая географическая плотность месторождений в России препятствует внедрению системы SCADA и ее масштабированию. Кроме того, она не поддерживает межоперационные связи оборудования и программ, трудна для изменений протоколов и их усовершенствования. Для многих применений был предложен ряд систем, основанных на ИВ, однако архитектура ПИВ с краевой компьютерной обработкой для ЦМ отсутствует несмотря на демонстрируемый ею значительный прогресс в технике связи между оборудованием и сетью данных.

В работе предложена структура ПИВ-КО в сочетании с проточным многопараметрическим экспресс-анализом с использованием ПМРА-IV для интеллектуального цифрового нефтяного месторождения. Представленная система позволяет обеспечить быстрый сбор данных по расширенному списку параметров УЭЦН и характеристик скважинной жидкости при удаленном мониторинге, оптимизирующем контрольные измерения. При автоматическом удаленном управлении операциями структура ПИВ-КО снижает потери времени при межаппаратном контакте. Данная система с краевой подсистемой, контактирующей с „облаком“, может быть применена на кустах скважин, где отсутствует Интернет. Таким образом, преодолеваются ограничения, связанные с рассеянием скважин на большом пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rosendahl T., Hepso V.* Integrated operations in the oil and gas industry: sustainability and capability development // Imprint of IGI Global. 2013.
2. *Тихомирнов Л. И.* Цифровизация: ключевые факторы успеха // Нефтегаз. 2019. В. 1–2. С. 142–143.
3. *Макеев А. А.* Оптимизация работы центробежных насосов в малодобитных скважинах доюрского комплекса // Нефтяное хозяйство. 2023. № 4. С. 98–100. DOI: 10/24887/0028-2448-2023-4-98-100.
4. Пат. 150614 РФ. Автоматический пробоотборник / *М. С. Немиров, С. И. Силантьев, Е. В. Савинов, Р. Р. Нурмухаметов.* Опубл. 27.07.2010. Бюл. № 21.
5. *Афанасьев М. Я., Грибовский А. А.* Концепция адаптивной платформы технологического оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 268–272. DOI: 10.17686/0021-3454-2015-58-4-268-272.
6. *Ramzey H., Badawy M., Elhosseini M., Elbaset A.* I2OT-EC: A Framework for Smart Real-Time Monitoring and Controlling Crude Oil Production Exploiting IIOT and Edge Computing // *Energies*. 2023. N 16. DOI: 10.3390/en16042023.
7. *Муслимов Р. Х., Плотникова И. Н.* Альтернативные подходы — залог создания прорывных технологий в области поиска, разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений // Нефть. Газ. Новации. 2018. № 9. С. 24–32.

8. *Чижик В. И.* Квантовая радиофизика. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 689 с.
9. *Safieva R. Z., Mishin V. D.* Systems Analysis of the Evolution of Views on Oil Systems: From Petroleum Chemistry to Petroinformatics // *Pet. Chem.* 2021. Vol. 61. P. 539–554.
10. *Kashaev R. S., Temnikov A. N., Idiatullin Z. Sh., Charitonov M. V., Farachov T. I.* NMR-Analyser for Automatic Control of Physical-Chemical Parameters of Crude Oil and Bitumen // *Extended Abstracts of XXVIII Ampere Congress „Magnetic Resonance & Related Phenomena“*, Canterbury, UK. 1996. P. 295–296.
11. Пат. 2544360 РФ. Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентных жидкостей методом ЯМР / *Р. С. Кашаев, А. Н. Темников, З. Ш. Идиятуллин*. Опубл. 20.03.2015. Бюл. № 8.
12. *Kashaev R., Nguyen Duk Ahn, Kozelkova V., Kozelkov O., Dudkin V.* Online Multiphase Flow Measurement of Crude Oil Properties Using Nuclear (Proton) Magnetic Resonance Automated Measurement Complex for Energy Safety at Smart Oil Deposits // *Energies.* 2023. N 16 (3). P. 1080. <https://doi.org/10.3390/en16031080>.
13. *Hogendoorn J., Boer A., Appel M., de Jong H., de Leeuw R.* Magnetic Resonance Technology. A New Concept for Multiphase Flow Measurement // 31th Intern. North Sea Flow Measurement Workshop, Tonsberg, Norway, 22–25 Oct. 2013.
14. *Deng F., Xiao L., Wang M.* et al. Online NMR Flowing Fluid Measurement // *Appl. Magn. Resonance.* 2016. N 47. P. 1239. doi:10.1007/s00723-016-0832-2.
15. Автоматизированные системы определения количественных и качественных характеристик газа, воды, нефти и нефтепродуктов на потоке: Проспект ВИТ [Электронный ресурс]: npp-vit.ru/index.php?option=comcontent&task=view&id=15&Itemid=35.
16. *Wanasinghe T. R., Gosine R. G., James L. A., Mann G. K. I., de Silva O., Warran P. J.* The Internet of Things in the Oil and Gas Industry: A Systematic Review // *IEEE Internet Things J.* 2020. N 7. P. 8654–8673.
17. *Ray P. P., Dash D., Salah K., Kumar N.* Blockchain for IoT-based healthcare: Background, consensus, platforms, and use cases // *IEEE Syst. J.* 2020. N 15. P. 85–94.
18. *Zuo Y., Qi Z.* A Blockchain-based IoT Framework for Oil Field Remote Monitoring and Control // *IEEE Access.* 2021. N 10. P. 2497–2514.
19. IoT Agenda. What Is IIoT (Industrial Internet of Things)?—Definition from TechTarget.Com. [Электронный ресурс]: (<https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Industrial-Internet-of-Things-IIoT>), 01.03.2022.
20. Simplilearn.com. Edge Computing Vs. Cloud Computing: Key Differences, 2022 [Электронный ресурс]: <https://www.simplilearn.com/edge-computing-vs-cloud-computing-article>.
21. *Козелков О. В., Кашаев Р. С., Михайлов А. Г., Козелкова В. О., Овсенко Г. А., TranVanTung, Nguyen Chi Kien.* Технологии экспресс-контроля и очистки нефти от примесей в мехатронной установке с управлением от комплекса на базе ПМР-релаксометрии // *Химическая технология.* 2022. № 3. С. 261–266.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Рустем Султанхамитович Кашаев**— д-р техн. наук, профессор; Казанский государственный энергетический университет, кафедра приборостроения и мехатроники; E-mail: Kashaev2007@yandex.ru
- Дык Ань Нгуен** — аспирант; Казанский государственный энергетический университет, кафедра приборостроения и мехатроники; E-mail: navupro1991@gmail.com
- Олег Владимирович Козелков** — д-р техн. наук, доцент; Казанский государственный энергетический университет, кафедра приборостроения и мехатроники, заведующий кафедрой; E-mail: Ok.1972@list.com

Поступила в редакцию 01.08.2023; одобрена после рецензирования 01.02.2024; принята к публикации 22.03.2024.

REFERENCES

1. Rosendahl T., Hepso V. *Integrated Operations in the Oil and Gas Industry: Sustainability and Capability Development*, Imprint of IGI Global, 2013.
2. Tikhomirnov L. I. *Oil and Gas*, 2019, no. 1–2, pp. 142–143 (in Russ.).
3. Makeev A. A. *Oil-industry*, 2023, no. 4, pp. 98–100, DOI: 10/24887/0028-2448-2023-4-98-100 (in Russ.).
4. Pat. RU150614, *Avtomaticheskii probotoornik (Automated Probe Sampling)*, M.S. Nemirov, S.I. Silantiev, E.V. Savinov, R.R. Nurmuchametov, Priority 27.07.2010, *Bulletin* 21 (in Russ.).
5. Afanasiev M. Y., Gribovsky A. A. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 4(58), pp. 268–272, DOI: 10.17686/0021-3454-2015-58-4-268-272. (in Russ.)
6. Ramzey H., Badawy M., Elhosseini M., Elbaset A. *Energies*, 2023, vol. 16, <https://doi.org/10.3390/en16042023>.

7. Muslomov R. Ch., Plotnikov I. N. *Oil. Gas. Novations*, 2018, no. 9, pp. 24–32 (in Russ.).
8. Chizhik V. I. *Kvantovaya radiofizika (Quantum Radiophysics)*, St. Petersburg, 2004, 689 p. (in Russ.).
9. Safieva R. Z., Mishin V. D. *Pet. Chem.*, 2021, vol. 61, pp. 539–554.
10. Kashaev R. S., Temnikov A. N., Idiatullin Z. Sh., Charitonov M. V., Farachov T. I. *Magnetic Resonance & Related Phenomena, XXVIII Ampere Congress, Canterbury, UK, 1996*, pp. 295–296.
11. Pat. RU2544360, *Ustroystvo dlya izmereniya sostava i raskhoda mnogokomponentnykh zhidkostey metodom YAMR (Device for Measurement of Composition and Yield PF Many Component Liquids by NMR Method)*, R.S. Kashaev, A.N. Temnikov, Z.Sh. Idiatullin, Priority 24.12.2014, Published 20.03.2015, Bulletin 8. (in Russ.)
12. Kashaev R., Nguyen Duk Ahn, Kozelkova V., Kozelkov O., Dudkin V. *Energies*, 2023, no. 3(16), pp. 1080, <https://doi.org/10.3390/en16031080>.
13. Hogendoorn J., Boer A., Appel M., de Jong H., de Leeuw R. *31th International North Sea Flow Measurement Workshop*, Tonsberg, Norway, October 22–25, 2013.
14. Deng F., Xiao L., Wang M. et al. *Appl. Magn. Resonance*, 2016, no. 47, pp. 1239, DOI:10.1007/s00723-016-0832-2.
15. npp-vit.ru/index.php?option=comcontent&task=view&id=15&Itemid=35. (in Russ.)
16. Wanasinghe T. R., Gosine R. G., James L. A., Mann G. K. I., de Silva O., Warrian P. J. *IEEE Internet Things J.*, 2020, vol. 7, pp. 8654–8673.
17. Ray P. P., Dash D., Salah K., Kumar N. *IEEE Syst. J.*, 2020, vol. 15, pp. 85–94.
18. Zuo Y., Qi Z. *IEEE Access*, 2021, vol. 10, pp. 2497–2514.
19. IoT Agenda. What Is IIoT (Industrial Internet of Things)? — Definition from TechTarget.Com, <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Industrial-Internet-of-Things-IIoT>.
20. Simplilearn.com. *EdgeComputingVs. Cloud Computing: Key Differences*, 2022, <https://www.simplilearn.com/edge-computing-vs-cloud-computing-article>.
21. Kozelkov O. V., Kashaev R. S., Michailov A. G., Kozelkova V. O., Ovseenko G. A., Tran Van Tung, Nguyen Chi Kien, *Chimicheskaya tehnologiya*, 2022, no. 3, pp. 261–266 (in Russ.).

DATA ON AUTHORS

- | | |
|--------------------------|--|
| Rustem S. Kashaev | — Dr. Sci., Professor; Kazan State Energy University, Department of Instrument Making and Mechatronics; E-mail: kashaev2007@yandex.ru |
| Duc Anh Nguyen | — Post-Graduate Student; Kazan State Energy University, Department of Instrument Making and Mechatronics; E-mail: navypro1991@gmail.com |
| Oleg V. Kozelkov | — Dr. Sci., Associate Professor; Kazan State Energy University, Department of Instrument Making and Mechatronics; Head of the Department; E-mail: Ok.1972@list.com |

Received 01.08.2023; approved after reviewing 01.02.2024; accepted for publication 22.03.2024.

СТЕНД КСД-2 ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СКОРОСТИ И ДЛИНЫ

И. В. Алексеев*, Д. С. Замятин

*Уральский научно-исследовательский институт метрологии —
филиал Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева,
Екатеринбург, Россия*

** alekseeviv.work@gmail.com*

Аннотация. Обсуждается текущее состояние в области метрологического обеспечения лазерных и оптических измерителей скорости и длины. Показана актуальность совершенствования эталонной базы для метрологического обеспечения таких средств в соответствии с современными потребностями. Для решения задачи разработан стенд измерения скорости и длины (пройденного пути) КСД-2, позволяющий проводить измерения скорости в диапазоне 0,1–50 м/с и длины в диапазоне 1–99 999 м. Представлено описание конструкции и принципа работы стенда, приведены результаты экспериментального определения его метрологических характеристик. Рассмотрены основные вклады, составляющие доверительные границы относительной погрешности измерения скорости и длины (пройденного пути) стенда КСД-2. Результаты исследования представляют интерес для метрологов, работающих в области измерения механических величин, инженеров-конструкторов, а также производителей и пользователей лазерных и оптических измерителей скорости и длины.

Ключевые слова: эталон, скорость, длина, лазерные датчики, бесконтактные датчики, датчики скорости, измерители скорости

Благодарности: работа выполнена при частичной финансовой поддержке УНИИМ — филиала ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в рамках ОКР „Скорость“; авторы выражают глубокую признательность заведующему отделом метрологии электрических измерений А. А. Ахмееву за предоставление оборудования для экспериментальных исследований, исполняющей обязанности заведующего лабораторией метрологии магнитных измерений и неразрушающего контроля И. С. Цай и М. А. Малыгину за развитие данного направления в деятельности УНИИМ.

Ссылка для цитирования: Алексеев И. В., Замятин Д. С. Стенд КСД-2 для метрологического обеспечения лазерных и оптических измерителей скорости и длины // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 5. С. 435–444. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-435-444.

STAND KSD-2 FOR METROLOGICAL SUPPORT OF LASER AND OPTICAL SPEED AND LENGTH METERS

I. V. Alekseev*, D. S. Zamyatin

*Ural Research Institute of Metrology — Branch of the D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology,
Ekaterinburg, Russia*

** alekseeviv.work@gmail.com*

Abstract. The current state of the art in the field of metrological support for laser and optical speed and length meters is discussed. The relevance of improving the reference base for metrological support of such tools in accordance with modern needs is shown. To solve the problem, the KSD-2 stand for measuring speed and length (distance traveled) is developed, allowing measurements of speed in the range of 0.1–50 m/s and length in the range of 1–99999 m. A description of the design and operation principle of the stand is presented, and experimentally determined metrological characteristics of the stand are given. The main contributions that make up the confidence limits of the relative error in measuring the speed and length (traveled path) of the KSD-2 stand are considered. The results of the study are of interest

to metrologists working in the field of measuring mechanical quantities, design engineers, as well as manufacturers and users of laser and optical speed and length meters.

Keywords: *standard, speed, length, laser sensors, contactless sensors, speed sensors, speed meters*

Acknowledgments: this work was partially financial supported by UNIIM — VNIIM within framework of RTD “Velocity”; authors expresses deep gratitude to Andrey A. Akhmeev, Head of the Department of Metrology of Electrical Measurements, for providing equipment for experimental research, to Irina S. Tsay, Acting Head of the Laboratory of Metrology of Magnetic Measurements and Non-Destructive Testing, and Mikhail A. Malygin for development of this direction in activities of UNIIM.

For citation: Alekseev I. V., Zamyatin D. S. Stand KSD-2 for metrological support of laser and optical speed and length meters. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 5. P. 435–444 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-435-444.

Введение. Измерение скорости и длины является распространенной задачей во многих областях промышленности. Измерители скорости и длины различного типа (роликовые, прижимные, индукционные и др.) используются на производственных линиях для измерения длины прокатного материала или в работе конвейерных весов и дозаторов непрерывного действия для расчета производительности и массы прошедшего груза. Одним из наиболее удобных способов измерений является бесконтактный способ, основанный на применении лазерных и оптических датчиков. Целесообразность применения данного способа обусловлена большой вариативностью монтажа датчиков в рабочую область без необходимости существенного изменения производственной линии с одновременным повышением точности измерений. Например, при аттестации государственного эталона единицы массы 5-го разряда* использовался бесконтактный измеритель скорости и длины ИСД-5, с помощью которого удалось уменьшить относительную погрешность при передачи единицы массы до 0,3 %. Кроме того, бесконтактные измерители скорости и длины являются мобильными, что позволяет легко перемещать их между объектами, где требуется контроль скорости и длины.

В настоящее время наиболее распространены бесконтактные измерители скорости и длины на основе методов доплеровской велосиметрии [1, 2] и пространственной фильтрации [3, 4] (далее — измерители), разработанные в 70-х годах прошлого века. Такие бесконтактные измерители применяются как по прямому назначению [5–9], так и в специфических целях, например, для измерения скорости при взрывных экспериментах [10]. На текущий момент в России Уральский научно-исследовательский институт метрологии — филиал Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург) является основной организацией, осуществляющей метрологическое обеспечение подобных бесконтактных измерителей с помощью „Государственного эталона единицы скорости в диапазоне значений от 0,2 до 50 м/с, единицы длины в диапазоне значений от 1 до 99999 м“ (далее — КСД-1). Следует отметить, что несмотря на наличие эталонов, таких как ГЭТ 189-2014 и ГЭТ 150-2012, в области измерений линейной скорости отсутствуют государственные поверочные схемы и государственные эталоны (за исключением КСД-1).

С помощью КСД-1 успешно проведены испытания бесконтактных измерителей как на основе метода доплеровской велосиметрии, так и на основе метода пространственной фильтрации. Наилучшая точность измерения скорости представленными измерителями характеризуется относительной погрешностью $\pm 0,1$ %, которая сопоставима с погрешностью ранее разработанных измерителей, равной $\pm 0,2$ % [5], однако последние были выполнены в виде крупногабаритных установок и имели ограниченный диапазон измерений в отличие от современных миниатюрных измерителей. Прогресс в этой области привел к увеличению востребованности бесконтактных измерителей с одновременным повышением требований к точности измерений в несколько раз. КСД-1 не в состоянии обеспечить современные потребности пользователей.

* Государственный эталон единицы массы 5-го разряда для весов непрерывного действия с диапазоном измерений массы свыше 100 кг, диапазоном измерения производительности свыше 500 кг/ч, диапазоном линейной плотности от 10 до 250 кг/м (номер 3.1.ZZB.0414.2022 в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений; Росстандарт, 2022.

В связи с этим в УНИИМ был разработан стенд измерения скорости и длины (пройденного пути) КСД-2 (далее — стенд КСД-2), расширяющий технические и метрологические возможности существующего эталона. Основные технические отличия стенда КСД-2 заключаются в установке более функционального мотора, инкрементального энкодера с большим разрешением и контроллера, осуществляющего управление стендом КСД-2, с опцией синхронного измерения скорости и длины и обработки полученной информации.

Цель настоящей статьи — экспериментальное определение действительных метрологических характеристик стенда КСД-2.

Описание стенда КСД-2. Конструктивно стенд КСД-2 состоит из мотора, управляемого контроллером мотора, прецизионного колеса, приводимого в движение мотором, внешнего инкрементального энкодера, контроллера стенда КСД-2 и персонального компьютера с установленным специализированным программным обеспечением (рис. 1). Мотор, прецизионное колесо и внешний энкодер установлены на одном валу. В основу работы стенда КСД-2 положен принцип имитации движения поверхности с помощью вращающегося колеса.

Работа стенда КСД-2, структурная схема которого представлена на рис. 2, осуществляется следующим образом. С помощью специализированного программного обеспечения на компьютере задаются параметры измерений: скорость, длительность измерений, задержка перед измерениями. Соответствующий запрос отправляется в контроллер стенда КСД-2, где происходит преобразование запроса в команды контроллера мотора. Контроллер мотора осуществляет функции управления и отслеживания параметров работы мотора. Мотор стенда КСД-2 приводит в движение прецизионное колесо и позволяет с высокой стабильностью поддерживать скорость колеса в диапазоне от 0,1 до 50 м/с. Здесь и далее за скорость прецизионного колеса принята линейная скорость вращения (V). Поддержание заданной скорости производится в автоматическом режиме контроллером мотора, который непрерывно получает сигнал с внутреннего энкодера мотора с разрешением

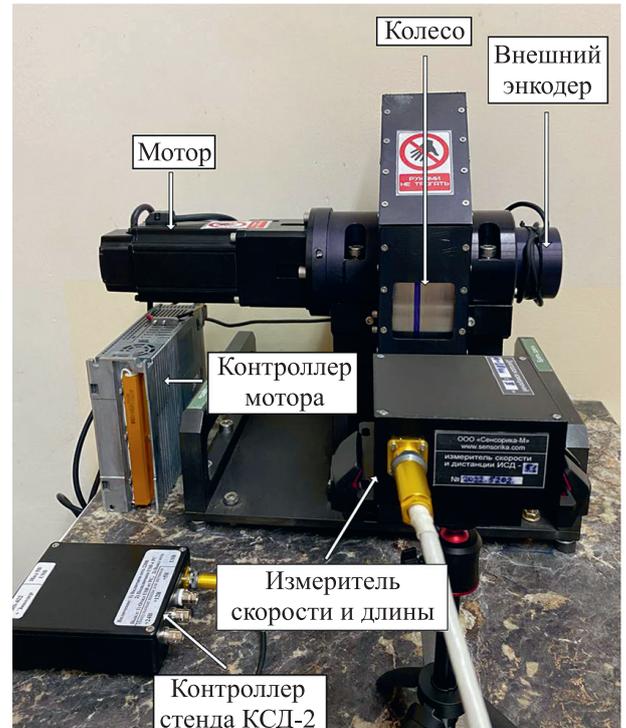


Рис. 1

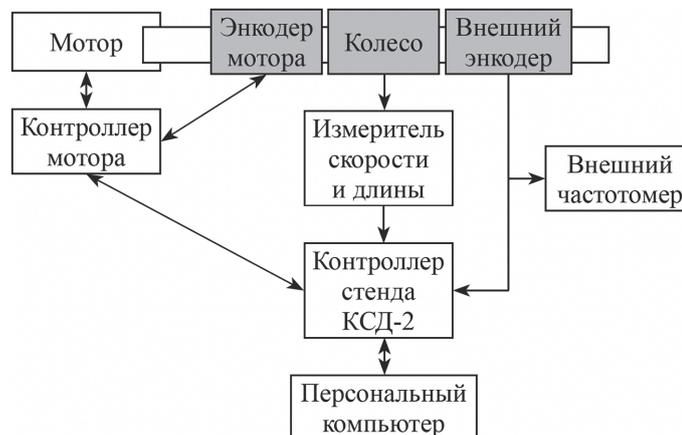


Рис. 2

3000 имп/ об. Прецизионное колесо с номинальной длиной окружности, равной 1 м, служит для хранения, воспроизведения и передачи единицы длины: внешний инкрементальный энкодер имеет разрешение 10 000 имп/об (в два раза выше, чем в КСД-1), которое с учетом длины окружности колеса может быть представлено в единицах длины — импульсы/метр. Передача единицы скорости осуществляется косвенным способом путем подсчета количества импульсов, сгенерированных энкодером за 1 с, и пересчета количества импульсов в единицу длины. Дискретность отсчета интервала времени составляет 10 мкс. Длина (пройденный путь) рассчитывается путем интегрирования скорости за время измерений. Передача единицы скорости и единицы длины лазерным и оптическим измерителям скорости и длины осуществляется методом сличения показаний стенда КСД-2 и контролируемого измерителя. Для этого импульсный выход контролируемого измерителя подключается к контроллеру стенда КСД-2, который производит подсчет количества импульсов и пересчет в единицу скорости и единицу длины. Получение сигнала с внешнего энкодера стенда КСД-2 и измерителя скорости и длины происходит одновременно. По завершении измерения на персональном компьютере создается файл с параметрами и результатами измерений.

Методика эксперимента и использованное оборудование. Опорные значения скорости и длины (пройденного пути) стенда КСД-2 определялись косвенным способом с помощью внешнего частотомера и микрометра. Опорным значениям соответствуют независимо определенные значения скорости прецизионного колеса и воспроизведенной длины (пройденного пути) стендом КСД-2 — эти значения являются основой для сравнения с показаниями стенда КСД-2. Микрометр и частотомер обеспечивают метрологическую прослеживаемость соответственно к ГЭТ 2-2021 и ГЭТ 1-2022 согласно локальной поверочной схеме для стенда КСД-2, утвержденной УНИИМ. Используемые средства измерений поверены.

Для проведения экспериментов использовалось следующее оборудование:

— частотомер электронно-счетный АКПП-5102, диапазон измерения количества импульсов от 1 до 10^{18} , пределы допускаемой абсолютной погрешности ± 1 импульс;

— микрометр Micron мод. МКЦ, диапазон измерения от 300 до 400 мм, пределы допускаемой абсолютной погрешности ± 9 мкм.

Контроль длины окружности прецизионного колеса. С помощью микрометра измерялся диаметр прецизионного колеса в пяти сечениях (примерно через каждые 35°). Действительная длина окружности прецизионного колеса вычислялась по формуле

$$l_d = \pi \sum_{m=1}^5 D_m / 5, \quad (1)$$

где D_m — диаметр прецизионного колеса в m -й точке.

Контроль скорости. Для определения метрологических характеристик измерения скорости с помощью специального переходника сигнал с внешнего энкодера стенда КСД-2 дублировался и один из выходов подключался к частотомеру в режиме измерения количества импульсов. После этого одновременно запускались измерения количества импульсов с помощью частотомера и скорости с помощью стенда КСД-2.

При скорости 0,1 м/с внешний энкодер стенда генерирует 1000 имп/об, поэтому относительная погрешность частотомера при этой скорости равна 0,1 %. Чтобы обойти это ограничение, измерения количества импульсов и скорости в диапазоне скоростей 0,1 ... 1 м/с производились в течение 10 с. Единичный результат измерения опорной скорости (определенной с помощью частотомера) вычислялся по формуле

$$V_{i, \text{on}} = \frac{N_i l_d}{\tau r}, \quad (2)$$

где N_i — единичный результат измерения количества импульсов, τ — время измерений, r — разрешение внешнего энкодера стенда КСД-2 (10 000 имп/об).

За единичный результат измерения скорости стендом КСД-2 принималось среднее арифметическое из измерений скоростей за 10 с. Такие пары измерений проводились 10 раз, за результат измерений принималось среднее арифметическое из 10 единичных измерений. При скорости свыше 1 м/с измерения частотомером и стендом проводились один раз в секунду. Единичное значение опорной скорости вычислялось по формуле (2), где $\tau = 1$ с. За результат измерений опорной и измеренной стендом скорости принималось среднее арифметическое из 10 измерений.

В табл. 1 представлены составляющие погрешности, доверительные границы относительной погрешности результата измерений и формулы, по которым они вычислялись. Следует отметить, что так как измерения скорости с помощью частотомера и стенда происходят одновременно и в одинаковых условиях, случайная составляющая, в основном связанная с нестабильностью поддержания скорости, для этих двух величин одинакова. Вследствие того, что случайные вклады одинаковы, при вычислении смещения (разности между опорным и измеренным значениями) они взаимокompенсируются. Поэтому вычислялось смещение единичных результатов измерений скорости от опорного значения, а случайная составляющая измерений выражена в виде среднеквадратического отклонения (СКО) смещений.

Таблица 1

Характеристика	Формула	Пояснение
Пределы допускаемой относительной погрешности частотомера	$\delta_{\text{ч}} = \max\left\{\frac{1}{N}100\right\}$	N_i — единичный результат измерения количества импульсов
Пределы допускаемой относительной погрешности микрометра	$\delta_{\text{м}} = \frac{0,000009}{l_{\text{д}}}100$	$l_{\text{д}}$ — действительная длина окружности прецизионного колеса, м
Погрешность индикации	$\delta_d = \frac{d}{2} \frac{100}{V_{\text{КСД}}}$	d — дискретность показаний стенда, м/с; $V_{\text{КСД}}$ — результат измерения скорости стендом КСД-2, м/с
Смещение	$\Delta_i = \frac{V_{i,\text{КСД}} - V_{i,\text{оп}}}{V_{i,\text{оп}}}100,$ $\Delta = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n}$	$V_{i,\text{КСД}}$ — единичный результат измерения скорости стендом КСД-2, м/с; $V_{i,\text{оп}}$ — единичный результат измерения опорной скорости, м/с; Δ_i — единичное смещение измеренной стендом КСД-2 скорости от опорного значения, %; n — количество измерений
Доверительные границы неисключенной систематической погрешности	$\theta = 1,1\sqrt{\delta_{\text{ч}}^2 + \delta_{\text{м}}^2 + \delta_d^2 + \Delta^2}$	—
Среднеквадратическое отклонение	$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \Delta)^2}{n(n-1)}}$	—
Доверительные границы относительной погрешности	$\delta = \frac{tS + \theta}{S + \theta/(1,1\sqrt{3})} \sqrt{S^2 + \left(\frac{\theta}{1,1\sqrt{3}}\right)^2}$	t — коэффициент Стьюдента при $P = 0,95$ и $n - 1$ степеней свободы

Контроль длины (пройденного пути). Для определения метрологических характеристик измерения длины (пройденного пути) дублированный выход внешнего энкодера стенда КСД-2 подключался к частотомеру в режиме измерения количества импульсов. С помощью программного обеспечения стенда КСД-2 задавались минимальная длина (L) и соответствующие параметры стенда согласно табл. 2. Одновременно запускались измерения количества импульсов с помощью частотомера и длины (пройденного пути) с помощью стенда КСД-2. Спустя установленное время измерения после остановки стенда считывались показания стенда и частотомера. Единичный результат измерения опорной длины (определенной с помощью частотомера) вычислялся по формуле

$$L_{i,\text{оп}} = \frac{N_i l_{\text{д}}}{r}. \quad (3)$$

Таблица 2

Заданная длина L , м	Скорость прецизионного колеса V , м/с	Время измерения τ , с	Количество единичных измерений n
1	0,1	10	10
100	10	10	10
10 000	25	400	5

Измерения повторялись в соответствии с табл. 2. За результат измерений принималось среднее арифметическое единичных измерений. Алгоритм расчета составляющих погрешности и доверительных границ относительной погрешности результата измерений полностью аналогичен алгоритму при контроле скорости (см. табл. 1).

Результаты измерений и обсуждение. На основе результатов измерений диаметра прецизионного колеса действительное значение длины окружности прецизионного колеса $l_d = 1,000000$ м. СКО результата измерения длины окружности колеса l_d составляет 0,0003 %, что пренебрежимо мало и не учитывается в дальнейших расчетах, а погрешность микрометра учитывается при расчете доверительных границ неисключенной систематической погрешности (см. табл. 1).

На рис. 3, а представлены составляющие доверительных границ неисключенной систематической погрешности θ (далее — НСП) при измерении скорости; вклад каждой составляющей НСП показан на рис. 3, б. На основе анализа полученных данных можно выделить три области по влиянию составляющих НСП: в диапазоне скоростей 0,1...0,3 м/с основной вклад в НСП (C_θ) вносит погрешность частотомера δ_q , в диапазоне 0,3...1 м/с — погрешность микрометра δ_m , а в диапазоне 5...50 м/с — смещение и погрешность микрометра. Следует отметить, что для последнего диапазона наблюдаемое смещение практически не меняется и приблизительно равно -0,005 %. На данный момент не совсем ясен источник этой систематической погрешности. Вероятно, это связано с тем, что высокочастотный сигнал с внешнего энкодера подключается напрямую к частотомеру, что может сопровождаться электрическими помехами, тогда как в контроллере стенда КСД-2 сигнал фильтруется от электрических помех. Как следствие, частотомер начинает измерение раньше, что приводит к сдвигу интервала счета импульсов между частотомером и стендом. Однако показания частотомера и стенда фиксировались с помощью видеосъемки, и расхождения в индикации результатов измерений не наблюдалось. Тем не менее СКО единичных смещений в диапазоне скоростей 5...50 м/с пренебрежимо мало (см. рис. 4), поэтому измерения все еще можно считать одновременными.

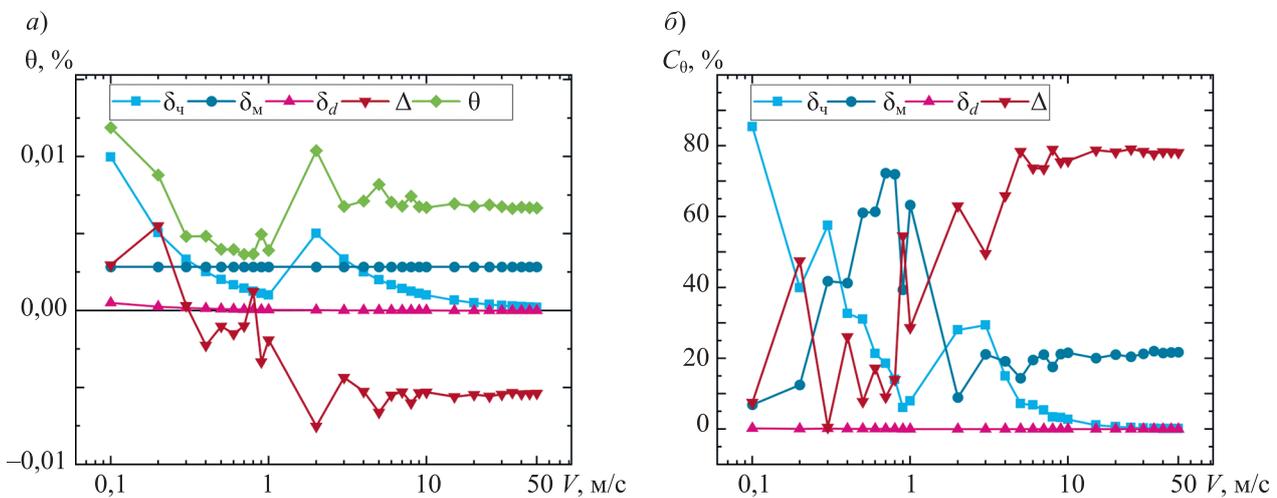


Рис. 3

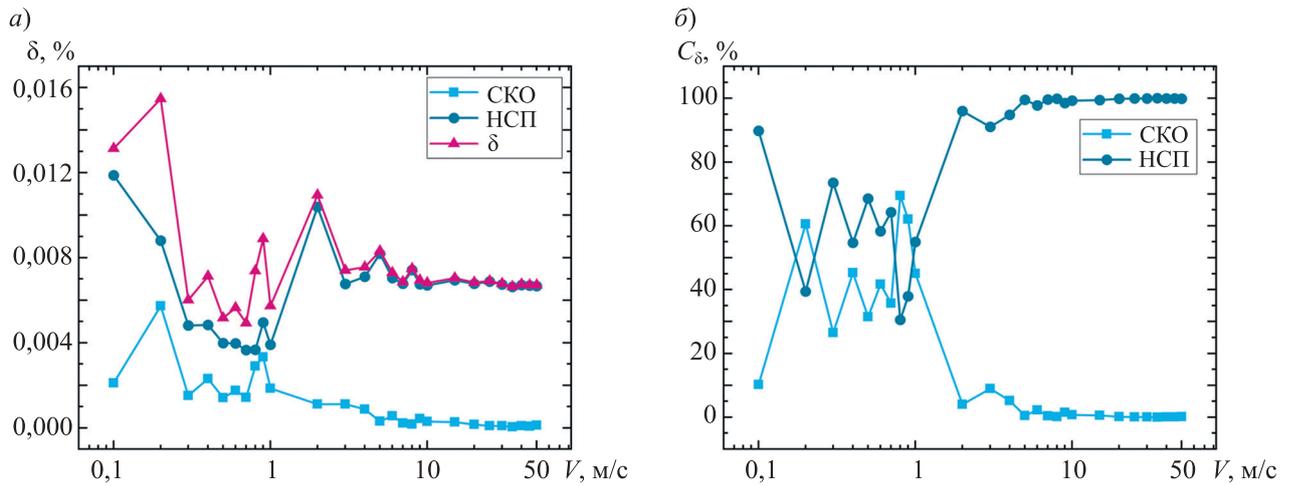


Рис. 4

На рис. 4, *a* представлены составляющие доверительных границ относительной погрешности δ результата измерения скорости, а на рис. 4, *б* — их соотношение. В диапазоне скоростей 0,1...1 м/с вклады (C_δ) НСП и СКО сопоставимы, при скорости свыше 1 м/с СКО становится пренебрежительно мало и основной вклад вносит НСП. Поэтому при устранении смещения, которое обусловлено методом измерения и вносит основной вклад в НСП, доверительные границы относительной погрешности измерений скорости стендом КСД-2 при скорости свыше 1 м/с могут быть увеличены до значений порядка 0,003 %.

Результаты определения метрологических характеристик измерения длины (пройденного пути) представлены в табл. 3. Наибольшее значение погрешности S наблюдается при минимально заданной длине. Это, как было упомянуто выше, связано с погрешностью частотомера, которая вносит большой вклад в НСП при малом количестве измеренных импульсов. При большей длине влияние частотомера пренебрежимо мало и основной вклад вносит погрешность микрометра. Примечательно, что СКО при $L > 1$ м значительно меньше, чем при измерениях скорости. Это связано с тем, что при измерении длины (пройденного пути) измерения количества импульсов и скорости производились в течение всего времени работы стенда: от начала движения колеса до его полной остановки. Таким образом, отсутствуют возможные сдвиги интервала времени измерений, что также выражается в практически нулевом отклонении измеренной длины от опорного значения.

Таблица 3

Заданная длина L , м	S , %	$\delta_{\text{ч}}$, %	$\delta_{\text{м}}$, %	$\delta_{\text{д}}$, %	Δ , %	θ , %	δ , %
1	0,003	0,009	0,0028	0,0000	-0,0034	0,011	0,017
10	0,0001	0,0001	0,0028	0,0000	-0,0001	0,003	0,003
10000	0,0000	0,0000	0,0028	0,0000	0,0000	0,003	0,003

Сравнение стенда КСД-2 с зарубежными аналогами и его практическая значимость.

Зарубежные аналоги систем для метрологического обеспечения лазерных и оптических измерителей скорости, в основе которых лежат методы доплеровской велосиметрии или пространственной фильтрации, имеют различные технические реализации, но базируются на принципиально одинаковом методе — имитации движения поверхности.

Важно отметить, что в зарубежных аналогах нормируется неопределенность результата измерений скорости. Несмотря на то, что алгоритмы расчета неопределенности и доверительных границ погрешности результата измерений различаются, как правило, результирующая расширенная неопределенность и доверительные границы погрешности отличаются друг от

друга незначительно, поэтому полученные метрологические характеристики стенда КСД-2 могут быть сопоставлены с метрологическими характеристиками зарубежных аналогов. Также следует отметить, что длина зачастую вычисляется как интеграл скорости по времени измерений, поэтому зарубежные аналоги нормируются только по диапазону воспроизводимых и измеряемых скоростей. Наиболее близкие по конструкции и принципу действия аналогичные системы представлены в работах [11, 12], где в качестве поверхности используется торец цилиндра или диска, а параметры вращения контролируются энкодером. В работах [13, 14] также в качестве имитируемой поверхности используется торец диска, однако в исследовании [13] его скорость контролируется другим лазерным измерителем скорости, а в [14] плоскость диска имеет перфорации, через которые проходит луч отдельно установленного лазера, направленного на светочувствительный датчик. Контроль скорости в этом случае осуществляется на основе частоты сигнала, генерируемого светочувствительным датчиком. Установка для контроля скорости, представленная в работах [15, 16], также оснащена системой, содержащей лазер и светочувствительный датчик, между которыми помещен диск с двумя отверстиями. Особенность этой установки заключается в том, что диск вращается в горизонтальной плоскости, а луч контролируемого измерителя скорости направлен на светоотражающую тонкую проволоку, расположенную перед оптической ловушкой (выемка на диске), минимизирующей нежелательные отражения. Авторы работы [17] предлагают совершенно другой подход к определению метрологических характеристик измерителей скорости: в качестве имитируемой поверхности используется не торец, а плоскость диска, на которой расположена прорезь. В данном случае скорость зависит от координат, куда направлен лазерный луч измерителя скорости относительно центра диска, и контроль скорости осуществляется с помощью светочувствительного датчика, детектирующего луч измерителя скорости, проходящий через прорезь диска.

В табл. 4 представлены технические и метрологические характеристики зарубежных аналогов стенда КСД-2.

Технические и метрологические характеристики разработанного стенда КСД-2, как было сказано, сопоставимы с характеристиками зарубежных аналогов, а при скоростях свыше 5 м/с значительно их превосходят. Основным преимуществом стенда КСД-2 по сравнению с аналогами является синхронность измерений, что позволяет не учитывать нестабильность воспроизведения скорости прецизионного колеса, СКО которой при скоростях от 0,1 до 1 м/с вносит весомый вклад порядка 0,3–0,01 %. Отметим, что предложенные в работах [12, 13, 17] системы являются прототипами. Установка, представленная в [11], крупногабаритная и немобильная. Устройство, используемое в [15, 16], является частью эталонной установки для калибровки средств измерения воздушного потока, разработанной Национальным институтом стандартов и технологий США. Стенд КСД-2 — законченное устройство и благодаря малым габаритам может быть транспортирован и использован в разных лабораториях.

Таблица 4

Аналог-источник	Имитация поверхности	Диапазон скоростей, м/с	Наилучшая расширенная неопределенность, %, $k = 2$, $P = 0,95$
[11]	Торец цилиндра	0–55,5	0,03
[12]	Торец колеса	0,02–10	0,08–0,5
[13]	Торец колеса	0–120 ¹	0,1
[14]	Оптический модулятор	0–32	0,05
[15, 16]	Специальный диск	0,15–40 (0,2–10) ²	1,2–0,32 (0,41)
[17]	Плоскость диска	—	0,24

Примечания:

¹ В основе установки лежит точный доплеровский измеритель скорости с диапазоном измерения скоростей от 0 до 120 м/с.

² В рамках модернизации неопределенность при малых скоростях улучшена.

Тем не менее по сравнению с аналогами стенд КСД-2 ограничен в диапазоне воспроизведения скоростей меньше 0,1 м/с, однако данное ограничение можно обойти, используя в конструкции стенда мотор, оптимизированный для воспроизведения малых скоростей.

Полученные экспериментальные данные использовались для проведения испытаний стенда КСД-2 в целях утверждения типа. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 января 2024 г. № 256 стенд КСД-2 утвержден в качестве типа средства измерений с регистрационным номером 91195-24 и может быть использован в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. В частности, открывается возможность проведения испытаний в целях утверждения типа и проверок лазерных и оптических измерителей скорости и длины (пройденного пути) с пределами допускаемой относительной погрешности измерений 0,06 %, что в 2,5 раза меньше текущих значений.

Заключение. Выполнены экспериментальные исследования стенда измерения скорости и длины (пройденного пути) КСД-2, предназначенного для метрологического обеспечения лазерных и оптических измерителей скорости и длины, основанных на методах доплеровской велосиметрии и пространственной фильтрации. Доверительные границы относительной погрешности измерения скорости в диапазоне 0,1...50 м/с находятся в диапазоне от $\pm 0,015$ до $\pm 0,007$ %, доверительные границы относительной погрешности измерения длины (пройденного пути) в диапазоне 1...99 999 м находятся в диапазоне от $\pm 0,017$ до $\pm 0,003$ %. При скоростях до 1 м/с основной вклад в погрешность измерений вносят частотомер и микрометр, при скоростях выше 5 м/с основной вклад в погрешность вносит смещение, обусловленное, по всей видимости, наличием электромагнитных помех. При измерении минимальной длины (1 м) основной вклад в погрешность измерений вносит частотомер, при более значительной длине — микрометр. Погрешность индикации при всех измерениях пренебрежительно мала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yeh Y., Cummins H. Z. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer // Appl. Physics Letters. 1964. Vol. 4, N 10. P. 176–178.
2. Cummins H. Z., Knable N., Yeh Y. Observation of Diffusion Broadening of Rayleigh Scattered Light // Physical Rev. Letters. 1964. Vol. 12, N 6. P. 150–153.
3. Ator J. T. Image-Velocity Sensing with Parallel-Slit Reticles // JOSA. 1963. Vol. 53, N 12. P. 1416–1422.
4. Aizu Y., Asakura T. Principles and development of spatial filtering velocimetry // Appl. Physics B. 1987. Vol. 43. P. 209–224.
5. Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н. Лазерное устройство для измерения скорости движения поверхностей // Квантовая электроника. 1986. Т. 13, № 12. С. 2442–2446.
6. Gong J. M., Yang H., Lin S. H. et al. Spatial filtering velocimetry for surface velocity measurement of granular flow // Powder Technology. 2018. Vol. 324. P. 76–84.
7. Hosokawa S., Matsumoto T., Tomiyama A. Measurement of bubble velocity using spatial filter velocimetry // Experiments in Fluids. 2013. Vol. 54. P. 1–12.
8. Расстов С. Ф. Оптические и лазерные датчики скорости и длины // Мир измерений. 2018. № 1. С. 12–14.
9. Меледин В. Г., Кротов С. В., Бакакин Г. В. и др. Лазерная доплеровская анемометрия горячего проката // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 175.
10. Беловолов М. И., Вовченко В. И., Канель Г. И. и др. Применение лазерных интерферометрических измерителей скорости во взрывных экспериментах // ЖТФ. 1987. Т. 57, № 5. С. 918–924.
11. Huang R., Nie X., Zhou J. Laser Doppler velocimeter and its calibration system // Measurement. 2019. Vol. 134. P. 286–292.
12. Piccato A., Francese C., Malvano R. A portable rotating disk prototype for LDA calibration // Flow Measurement and Instrumentation. 2014. Vol. 38. P. 54–61.
13. Liu C., Liu J. G., Kennel R. A rotational speed measuring and calibration system based on Laser Doppler velocimetry // XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”, Prague, Czech Republic, Aug. 30 – Sept. 4, 2015 [Электронный ресурс]: <http://www.chenyang-ism.com/2015-IMEKO-ChengLiu.pdf>, 04.05.2024.
14. Terra O., Hussein H. M. Simple and accurate calibration system for Laser Doppler Velocimeters // Optik. 2019. Vol. 179. P. 733–739.

15. Yeh T. T., Hall J. M. Uncertainty of NIST airspeed calibrations // Measurement Science Conf., Anaheim, California, USA, March 10–14, 2008 [Электронный ресурс]: <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/calibrations/2008mscair.pdf>, 04.05.2024.
16. Shinder I. I., Crowley C. J., Filla B. J., Moldover M. R. Improvements to NIST'S air speed calibration service // Flow Measurement and Instrumentation. 2015. Vol. 44. P. 19–26.
17. Shirai K., Ishimura S., Kawanami T., Hirasawa S. Development of a new velocity calibration method for laser velocimetry using multiple scattering points on a single slit aperture // Microsystem Technologies. 2016. Vol. 22. P. 1351–1357.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Игорь Викторович Алексеев

— Уральский научно-исследовательский институт метрологии — филиал Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева, лаборатория метрологии магнитных измерений и неразрушающего контроля; мл. науч. сотрудник;
E-mail: alekseeviv.work@gmail.com

Денис Сергеевич Замятин

— Уральский научно-исследовательский институт метрологии — филиал Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева, лаборатория метрологии магнитных измерений и неразрушающего контроля; заместитель заведующего лабораторией;
E-mail: lab261@uniim.ru

Поступила в редакцию 14.12.2023; одобрена после рецензирования 22.12.2023; принята к публикации 22.03.2024.

REFERENCES

1. Yeh Y., Cummins H. Z. *Applied Physics Letters*, 1964, no. 10(4), pp. 176–178.
2. Cummins H. Z., Knable N., Yeh Y. *Physical Review Letters*, 1964, no. 6(12), pp. 150–153.
3. Ator J. T. *JOSA*, 1963, no. 12(53), pp. 1416–1422.
4. Aizu Y., Asakura T. *Applied Physics B*, 1987, vol. 43, pp. 209–224.
5. Belousov P. Ya., Dubnischchev Yu. N. *Quantum Electronics*, 1986, no. 12(13), pp. 2442–2446. (in Russ.)
6. Gong J. M., Yang H., Lin S. H. et al. *Powder Technology*, 2018, vol. 324, pp. 76–84.
7. Hosokawa S., Matsumoto T., Tomiyama A. *Experiments in fluids*, 2013, vol. 54, pp. 1–12.
8. Rastopov S. F. *Mir izmereniy*, 2018, no. 1, pp. 12–14 (in Russ.).
9. Meledin V. G., Krotov S. V., Bakakin G. V. et al. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no. 2, pp. 175. (in Russ.).
10. Belovolov M. I., Vovchenko V. I., Kanel G. I. et al. *Technical Physics*, 1987, no. 5(57), pp. 918–924 (in Russ.).
11. Huang R., Nie X., Zhou J. *Measurement*, 2019, vol. 134, pp. 286–292.
12. Piccato A., Francese C., Malvano R. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2014, vol. 38, pp. 54–61.
13. Liu C., Liu J. G., Kennel R. *XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry"*, Prague, Czech Republic, August 30–September 4, 2015, URL: <http://www.chenyang-ism.com/2015-IMEKO-ChengLiu.pdf>.
14. Terra O., Hussein H. M. *Optik*, 2019, vol. 179, pp. 733–739.
15. Yeh T. T., Hall J. M. *Measurement Science Conference*, Anaheim, California, USA, March 10–14, 2008, <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/calibrations/2008mscair.pdf>.
16. Shinder I. I., Crowley C. J., Filla B. J., Moldover M. R. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2015, vol. 44, pp. 19–26.
17. Shirai K., Ishimura S., Kawanami T., Hirasawa S. *Microsystem Technologies*, 2016, vol. 22, pp. 1351–1357.

DATA ON AUTHORS

Igor V. Alekseev

— Ural Research Institute of Metrology — Branch of the D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, Laboratory of Metrology of Magnetic Measurements and Non-Destructive Testing; Junior Researcher;
E-mail: alekseeviv.work@gmail.com

Denis S. Zamyatin

— Ural Research Institute of Metrology — Branch of the D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, Laboratory of Metrology of Magnetic Measurements and Non-Destructive Testing, Deputy Head of the Laboratory;
E-mail: lab261@uniim.ru

Received 14.12.2023; approved after reviewing 22.12.2023; accepted for publication 22.03.2024.

ПРОБЛЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ ПО ЕЕ РАЗМЕРНОСТИ

В. Г. Терещенко

*Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия
tereshvg@yandex.ru*

Аннотация. Исследуется возможность выражения смысла физической величины с помощью размерности и единицы измерения. Показано, что для создания науки о величинах, работы компьютерных программ и искусственного интеллекта нужна классификация величин по смысловым признакам. Цель статьи — показать непригодность единиц измерения и их размерностей для идентификации величин и необходимость разработки иного способа классификации величин по их смыслу. На примерах проверяется возможность передать смысл физической величины при помощи возведенной в некоторую степень размерности или единицы измерения основной величины. Все рассмотренные примеры дали отрицательные результаты. Выявлена особенность величины „длина“ в вопросе образования размерности производной величины путем возведения размерности основной величины в степень. Эта особенность объясняется возможностью объединения длины с различными направлениями в пространстве. Возведение размерности длины в степень подменяет операции с векторами. Случаи возведения в степень других размерностей являются бессмысленными фрагментами и не соответствуют какой-либо величине, принятой в науке. Рекомендуется направить усилия на изучение и формализацию связей между самими величинами, объединив подходы в таких науках, как метрология, физика, математика, теория познания.

Ключевые слова: *размерность величины, единица измерения, система величин, вектор, физический смысл, искусственный интеллект, определительное уравнение*

Ссылка для цитирования: *Терещенко В. Г. Проблема идентификации физической величины по ее размерности // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 5. С. 445–454. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-445-454.*

THE PROBLEM OF IDENTIFYING A PHYSICAL QUANTITY BY ITS DIMENSION

V. G. Tereshchenko

*North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia
tereshvg@yandex.ru*

Abstract. The possibility of expressing the meaning of a physical quantity using dimension and unit of measurement is explored. It is shown that in order to create a science of quantities, for the operation of computer programs and artificial intelligence with the meaning of quantities, a classification of quantities according to semantic criteria is needed. The purpose of the article is to show the unsuitability of units of measurement and their dimensions for identifying quantities and the need to develop a different way of classifying quantities according to their meaning. Using examples, the possibility to convey the meaning of a physical quantity by raising dimension or unit of measurement of the basic quantity to a certain power is tested. All considered examples gives negative results. A peculiarity of the quantity “length” has been revealed in the matter of forming the dimension of a derivative quantity by raising the dimension of the main quantity to a power. This feature is explained by the possibility of combining length with different directions in space. Raising the length dimension to a power replaces operations with vectors. Cases of exponentiation of other dimensions are meaningless fragments and do not correspond to any value accepted in science. It is recommended to direct efforts to study and formalize the connections between the quantities themselves, combining the approaches of such sciences as metrology, physics, mathematics, and theory of knowledge.

Keywords: *quantity dimension, measurement units, system of quantities, vector, physical meaning, artificial intelligence, defining equation*

For citation: *Tereshchenko V. G. The problem of identifying a physical quantity by its dimension. Journal of Instrument Engineering. 2024. Vol. 67, N 5. P. 445–454 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-445-454.*

Введение. Одна из задач, до сих пор не освоенных компьютерными программами и искусственным интеллектом, — это работа с физическим смыслом величин, выявление законов природы и разработка физико-математических моделей. Компьютерные программы достигли

больших успехов в математике, однако в математике величины не имеют размерностей, смысл величин по-прежнему обрабатывает человек. Люди и сами не знают, как открываются физические законы, каков алгоритм создания физических формул и уравнений, при этом большая роль отводится интуиции ученого.

В самой метрологии „прежде чем представить результат измерения, важно адекватно описать измеряемую величину“, как говорится в действующей версии Брошюры СИ*. Точно и однозначно идентифицировать величину по ее смыслу можно будет, когда будет выполнена классификация величин. Классификация должна быть формализована, т. е. выражена в специальной системе символов и знаков, отображающей закономерности взаимосвязи между величинами. Классификация есть в химии, биологии, других науках. Классификация составляет основу любой науки. Но в науке о физических величинах до сих пор нет достойной классификации — это говорит о том, что наука о величинах окончательно еще не сформирована. Она может сформироваться на стыке метрологии, физики, математики и теории познания.

Для работы со смыслами физических величин необходимо эти смыслы формализовать. За помощью в составлении формул и в проверке правильности их составления обычно обращаются к известному методу анализа размерностей [1, 2]. Этот метод базируется на понятиях основных и производных величин или основных и производных единиц. Используют оба понятия, поскольку по определению VIM-3 [3] основная единица — это единица измерения, принятая по соглашению для основной величины. Выбирают основные величины и соответствующие основные единицы в разных системах по-разному, руководствуясь „удобством“. Действующая версия Брошюры СИ фактически сдает в архив разделение единиц на основные и производные: „Определение SI путем фиксирования числовых значений семи определяющих констант приводит к тому, что это различие, в принципе, больше не требуется, поскольку все единицы, как основные, так и производные, могут быть выведены непосредственно из определяющих констант“. Таким образом, для метрологии (в области измерений) концепция основных и производных единиц сохраняется только потому, что „она полезна и исторически хорошо обоснована“, но для анализа размерностей она по-прежнему является базовой.

При использовании метода анализа размерностей нужно заранее перечислить факторы, влияющие на исследуемое явление. Способ или алгоритм выбора факторов отсутствует, выбор производится на основе интуиции исследователя. Анализ размерностей не распространяется на величины с размерностью „один“, на безразмерные множители. Во всех известных системах величин присутствуют одноименные величины, размерности которых совпадают, единицы измерения тоже совпадают, а физический смысл не совпадает. Для анализа размерностей часто не хватает основных единиц в системе. Эти и другие недостатки анализа размерностей не позволяют полноценно использовать его для работы с физическим смыслом величин.

Проблемы идентификации величин. В научных журналах, посвященных проблемам метрологии, вплоть до настоящего времени активно обсуждаются сложности и ошибки, возникающие при попытках использовать Интернациональную систему величин или Интернациональную систему единиц для классификации величин по их физическому смыслу, для идентификации величин и для программ компьютерной алгебры [4–13]. Метрологи обращают внимание на частные случаи совпадения единиц измерения у величин разного рода, на примеры таких единиц измерения, по которым невозможно угадать смысл величины. Во многих статьях рассматриваются проблемы, возникающие из-за того, что векторные величины в SI имеют такие же размерности и единицы измерения, как их модули [4]. С момента принятия SI до настоящего времени много споров вызывают единицы измерения и размерности угла и телесного угла, а также производных от них величин [5, 6]. Совпадение единиц измерения, а также размерностей работы и момента силы, скорости покрытия площади и кинематической вязкости и т. д. рассма-

* Международная система единиц (SI). Изд. 9-е. 2019. Bureau International des Poids et Mesures. Перевод на русский язык. Издание подготовлено Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт).

тривается в [3, 4], величин с размерностью „единица“ — в [7, 8, 11, 13], относительных величин, количества вещества и количества объектов — в [4, 9, 10, 12, 13]. Много сказано о путанице, возникающей вокруг единиц измерения „с⁻¹“, и об „исчезающих“ единицах измерения „один“ для количества объектов [7–13].

Какие методы решения проблемы предлагают авторы публикаций? Поиск способов идентификации ведется зачастую для отдельных величин, а не для системы SI в целом и не для всех возможных систем величин. Поиск ведется в рамках метрологии, т. е. посредством работы с единицами измерения: перевода единицы измерения из производных в основные или наоборот, изменения или добавления названия и обозначения единиц измерения. Обсуждаются варианты более подробного дополнительного словесного описания результатов измерения [8]. В [4] предлагается определять производные единицы только с помощью определений их величин и основных единиц системы, запретив упрощать единицы измерения алгебраически. Автор работы [7] считает, что обеспечить уникальный способ идентификации каждого рода величины не могут ни размерности, ни названия единиц измерения. Многие авторы обращаются к основам алгебры размерностей [14, 15], философски осмысливают новую редакцию СИ [16] и торопятся задействовать компьютеры для развития научной интуиции исследователей [17].

Разные варианты предлагаются в течение многих десятилетий, но решения до сих пор так и не найдены. Нужно ли и дальше продолжать попытки в том же духе, или следует искать иные способы формальной классификации физических величин? В настоящей статье предпринята попытка выяснить, могут ли в принципе единицы измерения и размерности отображать физический смысл величины. От ответа на этот вопрос зависит выбор пути решения проблемы. Цель работы — показать непригодность единиц измерения и их размерностей для идентификации величин и необходимость разработки иного способа классификации величин по их смыслу. Всеобъемлющее исследование способов классификации не является целью данной короткой статьи. Тем более, не предлагаются решения всех частных вопросов идентификации конкретных величин.

Методы. Чтобы понять, можно ли применять для идентификации величины выражение ее размерности через размерности основных величин, рассмотрим принцип образования размерности производной величины. Аналогично рассмотрим принцип образования производной единицы. Как сказано в Международном словаре по метрологии VIM 3 [3, п. 1.10], „В любой когерентной системе единиц существует только одна основная единица для каждой основной величины“. Поэтому принципы образования производных единиц и их размерностей — одинаковые, они изложены в VIM 3, в рекомендациях по межгосударственной стандартизации РМГ 29-2013*, в 9-м издании Брошюры СИ и в многочисленных научных и учебных изданиях. В действующей версии Брошюры СИ (п. 2.3.3) записано, что производные величины „могут быть выражены через основные величины в соответствии с уравнениями физики. Размерности производных величин записываются в виде произведений степеней размерностей основных величин с помощью уравнений, которые связывают производные величины с основными. В общем случае размерность любой величины Q записывается в виде размерного произведения:

$$\dim Q = T^\alpha L^\beta M^\gamma I^\delta \Theta^\varepsilon N^\zeta J^\eta, \quad (1)$$

где показатели степени α , β , γ , δ , ε , ζ и η , которые в основном являются малыми целыми числами и могут быть положительными, отрицательными или нулевыми, называются показателями размерности“; далее (п. 2.3.4): „Производные единицы определяются как произведения степеней основных единиц“.

Кроме Международной системы величин ISQ, опубликованной в сериях международных стандартов ISO 80000 и IEC 80000 „Quantities and Units“, на которой основана Международная система единиц (SI), созданы и другие системы величин. Системы величин различаются набором

* РМГ 29-2013. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ. 2014.

основных величин. Но во всех известных системах величин применяется такой же принцип построения формулы размерности и такой же принцип определения производных единиц.

Этот принцип появился из стремления создать систему когерентных единиц. Иными словами, решалась задача упрощения формул и уравнений за счет минимизации количества переводных коэффициентов между единицами взаимосвязанных величин разного рода [18]. Формула связи вида (1) между единицами основных величин и единицей производной величины позволяет легко установить, во сколько раз изменится единица производной величины при изменении единицы основной величины в заданное число раз. Производные единицы вместе с основными единицами, из которых они образуются без переводных коэффициентов (с коэффициентами, равными единице), составляют группу когерентных единиц. Как сказано в VIM-3 [3, п. 1.14, прим. 2], „Для когерентной системы единиц уравнения связи между численными значениями имеют такой же вид, включая численные коэффициенты, как и соответствующие уравнения связи между величинами“. При разработке формулы (1) не ставились задачи отображения физического смысла, классификации и идентификации величин. .

По мнению советского физика Л. А. Сена [19], слово „размерности“ следует связывать только со словом „единицы“, а не со словом „величины“. В [19] достаточно убедительно показано, что понятие „размерность физической величины“ лишено всякого смысла и может применяться только как разговорное сокращение понятия „размерность единицы данной физической величины, в рамках данной системы единиц“. Можно согласиться с тем, что размерности, определяемые по формуле (1), являются по сути размерностями единиц, а не величин. И если в дальнейшем будут предложены формулы образования самих производных величин, то, во избежание путаницы, называть их также размерностями или формулами размерности не нужно.

Уравнения физики не ограничены действиями умножения, деления и возведения в степень скалярных физических величин. В них встречаются показательные, логарифмические, тригонометрические и обратные тригонометрические функции, векторное и скалярное произведения векторов, умножение и деление вектора на скаляр. Однако в формулах размерностей типа (1) невозможно отобразить соответствующие этим функциям связи между величинами. Нет соответствующих связей и между единицами измерения. По этому ограничению уже понятно, что с помощью формул размерности или выражений для единиц измерения невозможно, в общем случае, передать смысл физической величины. Очень много величин разного рода (разного смысла) остаются абсолютно не распознанными при помощи размерностей и единиц измерения. Таким величинам присваивают размерность „один“ и единицу измерения „один“, называют их безразмерными или безразмерностными (VIM-3).

Но, может быть, возведение размерности или единицы измерения основной величины в некоторую степень соответствует по смыслу образованию реальной производной физической величины? Проверим это на примерах.

Вторая степень длины. Размерность L^2 и единица измерения „м²“ буквально должны соответствовать умножению скалярной величины „длина“ самой на себя или произведению двух скалярных величин рода „длина“. Но эта размерность присваивается величине „площадь“. Площадь параллелограмма A в аналитической геометрии представляется векторной величиной, ее можно вычислить, например, с помощью векторного произведения векторов длины

$$A = I_1 \times I_2, \quad (2)$$

где векторы I_1 и I_2 , соответствующие сторонам параллелограмма, обязательно должны различаться по направлению и, в общем случае, различаются по модулю.

Модуль площади параллелограмма

$$A = I_1 I_2 \sin \alpha \quad (3)$$

вычисляется с помощью функции „sin“, которая не отображается ни в единицах измерения, ни в формулах размерностей. Модуль площади круга

$$A_k = (\pi/4)d^2 \quad (4)$$

вычисляется с использованием множителя $\pi/4$, для которого ни в одной известной системе величин нет размерности и единицы измерения.

В данном примере приходим к выводу, что вторая степень размерности длины, как и вторая степень единицы длины, не в полной мере соответствует смыслу величины „площадь“. Как выразился Л. А. Сена [19, с. 22], „... для второй степени длины, т. е. произведения длины на длину, трудно предложить конкретный физический смысл“.

В [4] рассмотрен пример другой величины с размерностью L^2 . Это среднее значение линейной нормы объемного расхода топлива дорожным транспортным средством:

$$c = V/l, \quad (5)$$

где V — объем топлива, израсходованного на пути длиной l .

Формула (5) использовалась как определяющее уравнение для записи формулы размерности производной величины c . Объем V заменили на третью степень длины ребра l_1 куба и получили

$$c = l_1^3/l_2, \quad (6)$$

где l_2 — пройденное транспортным средством расстояние; длинам в числителе и знаменателе автор [4] присвоил разные индексы, поскольку эти величины задаются независимо. Но обозначения размерностей не предусматривают аналогичных нюансов смысла и сокращаются:

$$\dim c = \frac{L^3}{L} = L^2. \quad (7)$$

Поэтому размерностью линейной нормы объемного расхода топлива стала вторая степень длины, а единицей измерения — квадратный метр. Величины разного рода — расход топлива и площадь — имеют одинаковые размерности и единицы измерения. Автор работы [4] предлагает не упрощать выражения единиц измерения, но проблему идентификации это не решит. Нужно отметить, что размерность L^2 и единица измерения „м²“ не отображают смысла вообще никакой определенной величины, никакого определенного рода величин (в том числе и площади). И это наблюдается в любой системе величин.

Третья и четвертая степени длины. Размерность L^3 и единица измерения „м³“ буквально должны соответствовать двойному умножению скалярной величины „длина“ самой на себя, или, хотя-бы, соответствовать произведению трех скалярных величин рода „длина“. Все это лишено смысла. А во многих системах размерность L^3 и единицу измерения „м³“ присваивают величине „объем“. Но объем параллелепипеда в аналитической геометрии получается смешанным произведением трех некопланарных векторов

$$V = \mathbf{l}_1 \times \mathbf{l}_2 \cdot \mathbf{l}_3, \quad (8)$$

где векторы \mathbf{l}_1 , \mathbf{l}_2 и \mathbf{l}_3 , соответствующие сторонам параллелепипеда, обязательно должны различаться по направлению и, в общем случае, различаются по модулю. При вычислении числового значения объема параллелепипеда используются функции „sin“ и „cos“, которые не отображаются ни в единицах измерения, ни в формулах размерностей. Объем шара определяется с использованием числового коэффициента, который не отображается в размерности и в единице измерения. В этом примере приходим к выводу, что третья степень размерности длины, как и третья степень единицы длины, не в полной мере соответствует смыслу величины „объем“. Заметим, что эту же размерность и единицу измерения имеют еще такие разные по смыслу величины, как статический момент сечения относительно оси, момент сопротивления

при изгибе, полярный момент сопротивления. Иными словами, по размерности L^3 и единице измерения „м³“ невозможно угадать род величины, определить ее смысл.

Размерность L^4 и единицу измерения „м⁴“ имеют такие разные по смыслу геометрические характеристики поперечных сечений, как осевые моменты инерции, центробежный момент инерции, полярный момент инерции, т. е., определенного смысла конкретного рода величины размерность L^4 и единица измерения „м⁴“ не несут.

Объединение длины и направления. Длину можно рассматривать как скалярную величину, когда измеряется длина гибкой нити, которую можно как угодно изогнуть, выпрямить в любом направлении или свернуть в клубок. Умножение скалярной длины нити самой на себя не приводит к определению какого-либо свойства этой нити или свойства иного объекта или явления. Размерностям L^2 , L^3 , L^4 , понимаемым в точном соответствии с записями этих формул, не соответствует никакая осмысленная величина.

Можно рассматривать векторы длины, например векторы, проведенные из базовой точки детали к другим ее характерным точкам. Эти векторы могут различаться направлением и длиной. Присваивать им одну и ту же размерность L — значит, скрывать смысловые различия. Возводить размерность вектора в какую-либо степень — значит, игнорировать, искажать математические действия в определительном уравнении.

Давно известны предложения по введению разных размерностей и разных единиц измерения длины в разных направлениях [2] при решении задач анализа размерностей. По свидетельству Г. Хантли [2], идея этого метода была предложена в 1892 г. В. Вильямсом*. При разложении размерности длины по трем взаимно перпендикулярным направлениям вводились векторные единицы длины и размерности L_x , L_y , L_z . При сложении этих векторов образуется векторная единица длины и размерность L_v . Размерность площади была выражена как $L_x L_y$, $L_y L_z$ или $L_z L_x$, что лучше отображает смысл, чем L^2 .

Но в метрологии такие предложения могут быть восприняты, как попытка различать метры горизонтальные и метры вертикальные, т. е. как попытка нарушить принцип унификации единиц измерения. Нужно помнить о различии между размерностью величины и размерностью единицы измерения величины. Г. Хантли, утверждая, что „должно существовать вполне определенное соответствие между физическими величинами и их формулами размерности“ [2], явно имеет в виду размерности не единиц, а самих величин. Размерности единиц, образуемые по принципу формулы (1), не могут удовлетворять этому требованию.

Чтобы понять различия смысла нескольких разных величин, имеющих в СИ одинаковую размерность, например L^3 , нужно сравнивать направления измерений длины. Но в СИ отсутствует величина „направление“. В [2] Г. Хантли пишет, что „направление является такой же основной характеристикой (например, момента), как длина, масса и время. Кроме того, эта величина не зависит от остальных основных величин“, однако он не вводит еще одну основную величину „направление“ в систему величин. Дело в том, что связь направления с длиной в векторе не выражается известными действиями математики, в том числе действиями уравнения (1). В векторе направление *объединяется* с длиной. В предыдущих работах автора настоящей статьи [20, 21] предложено рассматривать направление как основную величину в системе самих величин, присвоить ей размерность „D“ от слова „direction“ — „направление“. „D“ — это условное обозначение рода самой величины, а не размерность единицы измерения. В формализации связей между самими величинами потребовалось ввести особое действие „объединение направления и длины“. Было предложено [20] обозначить объединение символом „°“, называемым „White Bullet“ в программе Word, а в редакторе формул называемым „композиция“. Смысл данного символа в предлагаемом обозначении размерности величины иной, нежели в обозначении произведения Адамара в операциях с матрицами или в обозначении композиции (суперпозиции) функций. Размерность радиус-вектора как величины, а не размерность его единицы измерения, т. е. ус-

* *Williams W.* On the relation of the dimensions of physical quantities to directions in space // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1892. Vol. 34 (208). P. 234–271.

ловное обозначение самой величины „радиус-вектор“ записывается как $D \circ L$. Предусмотрены действия векторного и скалярного умножения для таких размерностей. Это позволяет адекватно отобразить смысл векторных уравнений с помощью выражений для размерностей самих величин. Образование производной величины путем возведения основной величины в какую-либо степень в разрабатываемой в [20] системе самих величин не предусмотрено.

Возведение размерностей других величин в степень. ГОСТ 8.417-2002 определяет L^2 как размерность площади и L^3 как размерность объема или вместимости. Как здесь уже говорилось, эти размерности фактически являются размерностями единиц измерения и им соответствуют по несколько величин, имеющих разный смысл, т. е. разного рода, а причина совпадений — в игнорировании различий направлений у длины.

Не менее интересно то, что размерность длины оказывается уникальной в вопросе возведения в степень. Примеры образования размерности единицы производной величины возведением в положительную степень размерности какой-либо другой основной единицы СИ (M , T , I , Θ , N , J) или какой-либо производной единицы СИ отсутствуют. Только примеры с размерностью длины L можно найти в ГОСТ 8.417-2002, в справочниках, учебниках, научных статьях и монографиях. Так как направление непосредственно объединено только с одной основной величиной из системы СИ — с длиной L , то можно сделать вывод, что различия направлений длины породили этот эффект якобы возведения в степень. Как сказано в [21] применительно ко второй степени, „Мы пытаемся найти пример осмысленной производной физической величины, полученной возведением какой-либо величины во вторую степень, а не бессмысленный фрагмент, вырванный из контекста формулы. Но найти такой пример невозможно“. Без всяких оговорок можно распространить этот вывод на любую положительную степень, кроме первой, разумеется.

Например, можно найти фрагмент в виде времени в квадрате t^2 в составе формулы пути $l = at^2/2$, который пройден с постоянным ускорением a при отсутствии начальной скорости. Но величины с размерностью T^2 нет в справочниках и научной литературе. T^2 следует рассматривать как размерность единицы измерения фрагмента, не обладающего самостоятельным физическим смыслом. Такой фрагмент не выражает определенного свойства какого-либо явления, т. е. не может быть назван физической величиной. „Этот фрагмент не образован умножением времени самого на себя. Он возник в результате интегрирования скорости at по времени t как часть выражения для производной величины“ [21].

Аналогично можно рассмотреть пример возведения в степень *производной величины*, ее единицы измерения, а также размерности ее единицы измерения. Производная величина — скорость v — присутствует во второй степени в формуле кинетической энергии $mv^2/2$, где m — масса. Можно выделить из формулы фрагмент v^2 с размерностью единиц измерения $(L/T)^2 = (L^2/T^2)$. Но этот фрагмент не образован умножением скорости самой на себя, а является частью результата интегрирования импульса mv по скорости v . Не существует самостоятельной величины „скорость в квадрате“ как особого свойства какого-либо явления.

Отрицательные степени размерностей. Приведем некоторые примеры отрицательной степени размерности. С помощью минус первой степени размерности L основной величины „длина“ в СИ выражают размерности волнового числа и линейного коэффициента ослабления излучения: $L^{-1} = 1/L$. С помощью минус первой степени размерности T основной величины „время“ в СИ выражают размерности угловой скорости, частоты, активности нуклида в радиоактивном источнике: $T^{-1} = 1/T$. В таких случаях подразумевается наличие в числителе размерности „1“ (единица). Иными словами, размерность такой производной величины образована не возведением в степень размерности основной величины, а делением одной размерности на другую. Сама производная величина тоже не образована возведением в степень одной основной величины, например длины или времени. Эти производные величины образованы делением угла, или относительного ослабления излучения, или количества повторяющихся событий на длину или время. Не будем перечислять здесь все величины, имеющие в СИ размерность „1“, которая может занять место в числителе формулы размерности.

Аналогично, размерность единицы измерения углового ускорения T^{-2} подразумевает в числителе размерность угла (единица), а не образуется возведением размерности времени в минус вторую степень. Формула размерности единицы углового ускорения T^{-2} не передает смысла величины, не соответствует словесному определению этой величины и определительному уравнению.

Размерность основной величины в какой-либо отрицательной степени может быть несамостоятельной частью формулы размерности производной величины. Например, в размерности ускорения $L T^{-2}$ имеется фрагмент T^{-2} , которому не соответствует самостоятельная величина как свойство явления. Действие возведения размерности основной величины во вторую отрицательную степень не отображает действий с величинами при образовании производной величины.

Все сказанное о размерностях единиц можно повторить применительно к системным единицам измерения.

Заключение. С помощью единиц измерения или размерностей единиц невозможна полная классификация и идентификация величин по их физическому смыслу. На основе только лишь соображений соответствия единиц измерения или размерностей единиц невозможно составление уравнений и отсутствует гарантия проверки уравнений. Научный поиск следует направить на выявление связей между самими величинами, закономерностей образования самих величин, привлекая и развивая теорию познания и современный математический аппарат.

Современная теория анализа размерностей — это теория анализа размерностей единиц, а не величин. Поэтому требовать от нее классификации и идентификации самих величин и правильного отображения физического смысла величин невозможно.

Если нужно понять, как взаимосвязаны сами величины, а не их единицы измерения, если требуется выразить эту взаимосвязь в виде особой специальной формулы, если нужно классифицировать и идентифицировать сами величины по их смыслу, если предполагается дать компьютерной программе способность оперировать со смыслами величин, то необходимо следующее. Нужно понять, что размерности, определяемые как произведение степеней сомножителей, — это размерности единиц, они отображают взаимосвязь единиц измерения и не являются размерностями самих величин. Правила образования когерентных производных единиц не являются правилами образования производных величин. Следует признать, что действительные правила образования производных величин не сформулированы до сих пор. Отсутствие формулы для размерности самой величины, подмена ее формулой размерности единицы величины создает проблемы в течение десятков лет, и никакие частные случаи не будут решены, пока не будет преодолено это препятствие. Нужно осознать, что существует актуальная задача выявления связей между самими величинами. У этих связей иные закономерности, нежели у связей между единицами измерения. Цель данной публикации можно считать достигнутой, если автору удалось хотя бы зародить сомнение читателя в применимости единиц измерения и размерностей единиц для классификации и идентификации величин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bridgman P. W.* Dimensional analysis. New Haven, Yale University Press, 1932.
2. *Huntley H. E.* Dimensional analysis. N. Y.: Dover Publication, Inc., 1967. 158 p.
3. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины: Пер. с англ. и фр. / ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, Белорус. гос. ин-т метрологии. Изд. 2-е, испр. СПб: НПО „Профессионал“, 2010. 82 с.
4. *Emerson W. H.* On the algebra of quantities and their units // *Metrologia*. 2004. Vol. 41, N 6. L33–L37. DOI:10.1088/0026-1394/41/6/L02.
5. *Jacques E.* Romain Angle as a fourth fundamental quantity // *Journal of Research of the National Bureau of Standards-B. Mathematics and Mathematical Physics*. 1962. Vol. 66B, N 3.
6. *Mohr P. J.* et al. On the dimension of angles and their units // *Metrologia*. 2022. Vol. 59, N 5. DOI: 10.1088/1681-7575/ac7bc2.

7. Hall B. D. The Problem with ‘Dimensionless Quantities’ // MODELSWARD — 10th Intern. Conf. on Model-Driven Engineering and Software Development. 2022 [Электронный ресурс]: <https://orcid.org/0000-0002-4249-6863>
8. Brown R. J. C. A metrological approach to quantities that are counted and the unit one // *Metrologia*. 2021. Vol. 58, N 3. DOI: 10.1088/1681-7575/abf7a4.
9. Brown R. J. C., Brewer P. J. What is a mole? // *Metrologia*. 2020. Vol. 57, N 6. DOI:10.1088/1681-7575/ab9db7.
10. Brown R. J. C. The evolution of chemical metrology: distinguishing between amount of substance and counting quantities, now and in the future // *Metrologia*. 2018. Vol. 55. L25–33 [Электронный ресурс]: <https://orcid.org/0000-0001-6106-0996>.
11. Mohr P. J., Phillips W. D. Dimensionless units in the SI // *Metrologia*. 2014. Vol. 52. P. 40–47. DOI: 10.1088/0026-1394/52/1/40.
12. Güttler B. et al. Amount of substance and the mole in the SI // *Metrologia*. 2019. Vol. 56. 044002. DOI: 10.1088/1681-7575/ab1fae.
13. Cooper G., Humphry S. M. The ontological distinction between units and entities // *Synthese*. 2012. N 187. P. 393–401. DOI: 10.1007/s11229-010-9832-1.
14. Raposo A. P. The algebraic structure of quantity calculus // *Measurement Science Rev.* 2018. N 4. P. 147–157.
15. Raposo A. P. The Algebraic Structure of Quantity Calculus II: Dimensional Analysis and Differential and Integral Calculus // *Measurement Science Rev.* 2019. N 70–78. DOI: 10.2478/msr-2019-0012.
16. de Courtenay N., Darrigol O., Schlaudt O. The Reform of the International System of Units (SI). Philosophical, Historical and Sociological Issues. London: Routledge, 2019. 220 p. DOI: 10.4324/9781351048989
17. Pascal F. et al. Scientific intuition inspired by machine learning-generated hypotheses // *Machine Learning: Science and Technology*. 2021. Vol. 2. P. 025027 [Электронный ресурс]: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2632-2153/abda08>.
18. Терещенко В. Г. Состояние вопроса систематизации величин // Актуальные проблемы инженерных наук: Материалы X (67-й) ежегодной науч.-практ. конф. Северо-Кавказского федерального университета. Ставрополь, 2023. С. 335–337.
19. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности: Учебно-справ. рук-во. М.: Наука, 1988. 432 с.
20. Терещенко В. Г. О размерностях векторных величин в механике // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2023. № 20. С. 40–45. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-20-40-45.
21. Терещенко В. Г. О несоответствии смысла определительного уравнения формуле размерности на примерах математического действия возведения в квадрат // Материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. „Фундаментальные основы механики“, 20 окт. 2023 г. СПб: НИЦ МС, 2023. № 12. 166 с. DOI: 10.26160/2542-0127-2023-12-23-27.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Владимир Григорьевич Терещенко — канд. техн. наук, доцент; Северо-Кавказский федеральный университет, Инженерный институт; кафедра технической эксплуатации автомобилей; доцент; E-mail: tereshvg@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.12.2023; одобрена после рецензирования 20.12.2023; принята к публикации 22.03.2024.

REFERENCES

1. Bridgman P. W. *Dimensional analysis*, New Haven, Yale University press, 1932.
2. Huntley H. E. *Dimensional analysis*, NY, Dover Publication, Inc., 1967, 158 p.
3. International Vocabulary of Metrology — Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM) Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG2), 2008, https://ncc.nesdis.noaa.gov/documents/documentation/JCGM_200_2008.pdf.
4. Emerson W. H. *Metrologia*, 2004, no. 6(41), pp. L33–L37, DOI: 10.1088/0026-1394/41/6/L02.
5. Jacques E. *Journal of Research of the National Bureau of Standards-B. Mathematics and Mathematical Physics*, 1962, no. 3(66B).
6. Mohr P. J. et al. *Metrologia*, 2022, no. 5(59), <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ac7bc2>.
7. Hall B. D. *MODELSWARD, 10th International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development*, 2022, <https://orcid.org/0000-0002-4249-6863>.
8. Brown R. J. C. *Metrologia*, 2021, no. 3(58), <https://doi.org/10.1088/1681-7575/abf7a4>.
9. Brown R. J. C., Brewer P. J. *Metrologia*, 2020, no. 6(57), <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab9db7>.
10. Brown R. J. C. *Metrologia*, 2018, no. 55, pp. L25–33, <https://orcid.org/0000-0001-6106-0996>.
11. Mohr P. J., Phillips W. D. *Metrologia*, 2014, vol. 52, pp. 40–47, DOI: 10.1088/0026-1394/52/1/40.

12. Güttler B. et al. *Metrologia*, 2019, vol. 56, pp. 044002, <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab1fae>.
13. Cooper G., Humphry S. M. *Synthese*, 2012, no. 187, pp. 393–401, DOI: 10.1007/s11229-010-9832-1.
14. Raposo A. P. *Measurement Science Review*, 2018, no. 4, pp. 147–157.
15. Raposo A. P. *Measurement Science Review*, 2019, pp. 70–78, DOI: 10.2478/msr-2019-0012.
16. de Courtenay N., Darrigol O., Schlaudt O. The Reform of the International System of Units (SI). *Philosophical, Historical and Sociological Issues*, Routledge, London, 2019, 220 p., <https://doi.org/10.4324/9781351048989>.
17. Pascal F. et al. *Machine Learning: Science and Technology*, 2021, vol. 2, pp. 025027, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2632-2153/abda08>.
18. Tereshchenko V. G. *Aktual'nyye problemy inzhenernykh nauk (Current Problems of Engineering Sciences)*, *Materials of the X (67th) Annual Scientific and Practical Conference of the North Caucasus Federal University*, Stavropol, 2023, pp. 335–337. (in Russ.)
19. Sena L. A. *Edinicy fizicheskikh velichin i ix razmernosti (Units of Physical Quantities and Their Dimensions)*, Moscow, 1988, 432 p. (in Russ.)
20. Tereshchenko V. G. *Transport, mining and construction engineering: science and production*, 2023, no. 20, pp. 40–45, DOI: 10.26160/2658-3305-2023-20-40-45. (in Russ.)
21. Tereshchenko V. G. *Fundamental'nyye osnovy mekhaniki (Fundamentals of Mechanics)*, *Materials from the VIII International Scientific and Practical Conference*, October 20, 2023, St. Petersburg, 2023, no. 12, pp. 166, <https://doi.org/10.26160/2542-0127-2023-12-23-27>.

DATA ON AUTHOR

Vladimir G. Tereshchenko

— PhD, Associate Professor; North Caucasus Federal University, Engineering Institute, Department of Technical Operation of Vehicles; Associate Professor; E-mail: tereshvg@yandex.ru

Received 15.12.2023; approved after reviewing 20.12.2023; accepted for publication 22.03.2024.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

BRIEF NOTES

УДК 53.072.33

DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-455-458

АЛГОРИТМ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕННЫХ ШКАЛ ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЕННЫХ СТАНДАРТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНЫХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

А. П. Алешкин, И. В. Соломянный*

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия,

** ilya.solomyannyi@yandex.ru*

Аннотация. Представлен перспективный подход к решению задачи синхронизации шкал времени с применением трех мобильных радиотелескопов. Приведены результаты расчета неточности формирования шкалы времени одного мобильного радиотелескопа и шкал времени двух других, участвующих в наблюдении. Предложенный алгоритм позволяет оценить погрешность формирования местной шкалы времени и служит в качестве резервного для повышения устойчивости функционирования системы координатно-временного и навигационного обеспечения.

Ключевые слова: коррекция шкал времени, удаленные синхронизаторы, мобильный радиотелескоп

Ссылка для цитирования: Алешкин А. П., Соломянный И. В. Алгоритм синхронизации временных шкал пространственно разнесенных стандартов с использованием мобильных радиотелескопов // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 5. С. 455–458. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-455-458.

ALGORITHM FOR SYNCHRONIZING TIME SCALES OF SPATIALLY SEPARATED STANDARDS USING MOBILE RADIO TELESCOPES

A. P. Aleshkin, I. V. Solomyannyi*

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia,

** ilya.solomyannyi@yandex.ru*

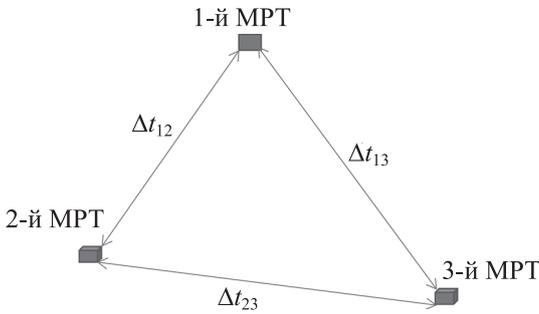
Abstract. A promising approach to solving the problem of time scale synchronization using three mobile radio telescopes is proposed. Results of calculating the inaccuracy of time scale formation of one mobile radio telescope and of time scales of two others participating in the observation, are presented. The proposed algorithm makes it possible to estimate the error in the formation of a local time scale and serves as a backup for increasing the stability of coordinate-time and navigation support system functioning.

Keywords. time scale correction, remote synchronizers, mobile radio telescope

For citation: Aleshkin A. P., Solomyannyi I. V. Algorithm for synchronizing time scales of spatially separated standards using mobile radio telescopes. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 5. P. 455–458 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-455-458.

Одним из перспективных направлений развития координатно-временного и навигационного обеспечения специальных потребителей, а также совершенствования Государственной системы единого времени и эталонных частот „Цель“ является применение мобильных радиоинтерферометров с длинной базой. Актуальность и важность коррекции шкал времени обусловлена тем, что измерения, проводимые с помощью мобильных радиотелескопов, могут обеспечить точность 0,1 нс/сутки [1, 2].

Рассмотрим возможность определения величин расхождения шкал времени (ШВ) трех пространственно разнесенных стандартов частоты времени (СЧВ). В качестве измерительных средств используем мобильные радиотелескопы (МРТ), реализующие технологию радиоинтерферометрического приема излучения внегалактических источников — квазаров [3].



Проанализируем задержку прихода сигнала по одному квазару одновременно на трех базах: Δt_{12} — между 1-м и 2-м МРТ, Δt_{13} — между 1-м и 3-м МРТ, Δt_{23} — между 2-м и 3-м МРТ.

Формализуем соотношения для указанных задержек в предположении, что истинные значения задержек $\Delta t_{12\text{ист}}$, $\Delta t_{13\text{ист}}$, $\Delta t_{23\text{ист}}$ искажаются только при временной привязке результатов приема аналогового сигнала, соответствующего излучению выбранного квазара, что приводит к погрешности формирования текущей шкалы времени, которую и предполагается рассчитать (см. рисунок).

Тогда соотношения для задержек при приеме излучения на три базы примут следующий вид:

$$\Delta t_{12} = \Delta t_{12\text{ист}} + \delta t_1 + \delta t_2;$$

$$\Delta t_{13} = \Delta t_{13\text{ист}} + \delta t_1 + \delta t_3;$$

$$\Delta t_{23} = \Delta t_{23\text{ист}} + \delta t_2 + \delta t_3,$$

где δt_1 , δt_2 , δt_3 — уходы соответствующих ШВ СЧВ, используемых при временной привязке измерений к ШВ соответственно 1, 2 и 3-го МРТ.

Суммируем два первых уравнения и вычтем из суммы третье:

$$\begin{aligned} \Delta t_{12} + \Delta t_{13} - \Delta t_{23} &= \Delta t_{12\text{ист}} + \delta t_1 + \delta t_2 + \Delta t_{13\text{ист}} + \delta t_1 + \delta t_3 - (\Delta t_{23\text{ист}} + \delta t_2 + \delta t_3) = \\ &= \Delta t_{12\text{ист}} + 2\delta t_1 + \Delta t_{13\text{ист}} - \Delta t_{23\text{ист}}. \end{aligned}$$

В левой части данного выражения представлены задержки, полученные в результате реальных измерений, а в правой части — их расчетные значения (могут быть априори получены при точной привязке на местности позиций фазовых центров антенн радиотелескопов) и удвоенная погрешность ухода ШВ СЧВ для 1-го МРТ. Тогда:

$$\begin{aligned} \delta t_1 &= \Delta t_{12} + \Delta t_{13} - \Delta t_{23} - (\Delta t_{12\text{ист}} + \Delta t_{13\text{ист}} - \Delta t_{23\text{ист}}) = \\ &= (\Delta t_{12} - \Delta t_{12\text{ист}}) + (\Delta t_{13} - \Delta t_{13\text{ист}}) + (\Delta t_{23\text{ист}} - \Delta t_{23}). \end{aligned}$$

Используя данное соотношение, можно рассчитать неточность формирования ШВ для 1-го МРТ и получить выражения для уходов ШВ остальных МРТ в соответствии с выражениями

$$\delta t_2 = \Delta t_{12} - \Delta t_{12\text{ист}} - \delta t_1 = (\Delta t_{13} - \Delta t_{13\text{ист}}) + (\Delta t_{23\text{ист}} - \Delta t_{23}),$$

$$\delta t_3 = \Delta t_{23} - \Delta t_{23\text{ист}} - \delta t_2 = (\Delta t_{23} - \Delta t_{23\text{ист}}) - (\Delta t_{13} - \Delta t_{13\text{ист}}).$$

Таким образом, при использовании трех МРТ, размещенных в заранее прецизионно привязанных позициях, можно решить задачу синхронизации ШВ удаленных синхронизаторов без использования опорной ШВ.

Представленная методика может быть использована при формировании групповой ШВ для пространственно-разнесенных средств системы единого времени [4].

Следует отметить, что представленные выкладки указывают на принципиальную возможность расчета уходов ШВ СЧВ в условиях, когда присутствуют только систематические погрешности (дрейфы) [5] временных шкал генераторов, используемых для привязки текущих измерений к временной шкале.

В общем случае решения задачи синхронизации также следует учитывать такие факторы, как случайные погрешности измерений [6] и их повышенную интенсивность при малой апертуре антенн, свойственной мобильному варианту радиотелескопа; неопределенности, связанные с неодинаковостью трасс распространения сигналов от внегалактических источников; неидентичность фидерных трактов и трактов приемных устройств; неточности позиционирования МРТ и др.

Влияние перечисленных факторов на процессы координатно-временного обеспечения потребителей хорошо известно специалистам, и существует немалое количество различных методик [7], призванных минимизировать возмущающее воздействие этих факторов [8].

Рассмотренный алгоритм был разработан с целью показать возможность решения задачи сличения ШВ удаленных синхронизаторов без использования навигационного поля спутниковых систем и транспортируемых СЧВ для перспективного направления координатно-временного и навигационного обеспечения специальных потребителей с помощью технологии мобильной радиоинтерферометрии с длинной базой при использовании МРТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Whitney A. R.* The Mark 5 VLBI Data System // Proc. of the 18th VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, Apr. 2007, Vienna. P. 33–38.
2. *Petrachenko B., Corey B., Himwich E., Ma Ch., Malkin Z., Niell A., Shaffer D., Vandenberg N.* Final Report of the Observing Strategies Sub-Group of IVS working Group 3 // VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems. 2005.
3. *Жуков Е. Т., Иванов Д. В., Курдубов С. Л.* Сличение удаленных стандартов частоты и времени методом РСДБ // Тр. Института прикладной астрономии РАН. 2012. Вып. 23. С. 125–130.
4. *Юдаев Д.* и др. Анализ высокоточных методов синхронизации разнесенных источников высокостабильных сигналов частоты и точного времени // Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах: Сб. материалов II Всерос. науч.-практ. конф., 1 окт. 2021 г., Москва. М.: 2022. С. 281–289.
5. *Царук А. А., Иванов Д. В., Жуков Е. Т., Карпичев А. С.* Сравнение шкал времени и частот с помощью радиоинтерферометра нового поколения // Тр. Института прикладной астрономии РАН. 2019. № 50. С. 79–86.
6. *Вытнов А. В., Иванов Д. В.* Модернизация хранителей времени и частоты РСДБ комплекса „Квazar-КВО“ // Тр. Института прикладной астрономии РАН. 2009. Вып. 19.
7. *Дугин Н. А., Гавриленко В. Г., Антипенко А. А.* и др. Радиоинтерферометр с независимым приемом ННГУ — НИРФИ — Ирбене. Первые результаты // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2013. N 1 (1). С. 79–85.
8. *Красовский П. А., Костромин В. П., Кошеляевский Н. Б.* Сличение территориально удаленных часов // Тр. Института прикладной астрономии РАН. 2009. Вып. 20. С. 203–214.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Андрей Петрович Алешкин** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru
- Илья Васильевич Соломянный** — адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: ilya.solomyanniy@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.01.2024; одобрена после рецензирования 19.01.2024; принята к публикации 22.03.2024.

REFERENCES

1. Whitney A. R. *Proc. of the 18th VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting*, April 2007, Vienna, pp. 33–38.
2. Petrachenko B., Corey B., Himwich E., Ma Ch., Malkin Z., Niell A., Shaffer D., Vandenberg N. *VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems*, 2005.
3. Zhukov E. T., Ivanov D. V., Kurdubov S. L. *Transactions of the Institute of Applied Astronomy RAS*, 2012, no. 23, pp. 125–130. (in Russ.)
4. Yudaev D. T. et al. *Tekhnologii polucheniya i obrabotki informatsii o dinamicheskikh ob"yektakh i sistemakh (Technologies for Obtaining and Processing Information about Dynamic Objects and Systems), Collection of materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference*, Moscow, October 1, 2021, 2022, pp. 281–289. (in Russ.)
5. Tsaruk A., Ivanov D., Zhykov E., Karpichev A. *Transactions of the Institute of Applied Astronomy RAS*, 2019, no. 50, pp. 79–86. (in Russ.)
6. Vytnov A. V., Ivanov D. V. *Transactions of the Institute of Applied Astronomy RAS*, 2009, no. 19. (in Russ.)
7. Dugin N. A., Gavrilenko V. G., Antipenko A. A., Dementiev A. F., Nechaeva M. B., Tikhomirov Yu. V., Kalinin A. V., Chagunin A. K. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2013, no. 1–1, pp. 79–85. (in Russ.)
8. Krasovsky P. A., Kostromin V. P., Koshelyaevsky N. B. *Transactions of the Institute of Applied Astronomy RAS*, 2009, no. 20, pp. 203–214. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- Andrey P. Aleshkin** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radioelectronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru
- Ilya V. Solomyanny** — Adjunct; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radioelectronic Systems of Space Complexes; E-mail: ilya.solomyanniy@yandex.ru

Received 15.01.2024; approved after reviewing 19.01.2024; accepted for publication 22.03.2024.

ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВА ВУДА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

В. М. Медунецкий^{1*}, С. В. Солк², В. С. Шевцов²¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
* vm57med@yandex.ru² Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,
Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия

Аннотация. Рассмотрена технология изготовления зеркал из сплава Вуда и приводится конкретный пример их изготовления. Заготовка из данного сплава получается путем литья в форму, изготовленную на 3D-принтере. Формообразование зеркала осуществляется на станке алмазного микроточения. Предложенный подход позволяет оперативно (в течение 1-2 суток) изготавливать прототипы зеркал сложной формы.

Ключевые слова: оптические зеркала, 3D-принтер, алмазное микроточение, сплав Вуда, прототипирование

Ссылка для цитирования: Медунецкий В. М., Солк С. В., Шевцов В. С. Применение сплава Вуда для изготовления оптических зеркал // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 5. С. 459–462. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-459-462.

APPLICATION OF WOOD'S ALLOY FOR OPTICAL MIRRORS MANUFACTURING

V. M. Medunetsky^{1*}, S. V. Solk², V. S. Shevtsov²¹ ITMO University, St. Petersburg, Russia
* vm57med@yandex.ru² Scientific-Research Institute of Opto-Electronic Instrumentation, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

Abstract. A technology for mirrors manufacturing from Wood's alloy is considered and a specific example of their manufacture is given. A workpiece from this alloy is obtained by casting into a mold made on a 3D printer. The shaping of the mirror is carried out on a diamond micro-turning machine. The proposed approach makes it possible to quickly (within 1–2 days) produce prototypes of mirrors of complex shapes.

Keywords: optical mirror, 3D printer, diamond micro-turning, Wood's alloy, prototyping

For citation: Medunetsky V. M., Solk S. V., Shevtsov V. S. Application of Wood's alloy for optical mirrors manufacturing. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 5. P. 459–462 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-459-462.

В настоящее время наблюдается постоянное усложнение промышленной продукции при сокращении ее жизненного цикла. Возросшая конкуренция заставляет производителей повышать показатели качества и сокращать время на разработку новых образцов [1]. В таких условиях возникает необходимость в опытных образцах — моделях и прототипах отдельных деталей и узлов. Под прототипом понимается приближенное представление одного или нескольких аспектов продукта, принятая работающая модель или опытный образец [2]. Создание прототипов позволяет изучить конструкцию, выявить и устранить дефекты, принять решение о целесообразности серийного производства [1].

В работе [3] отмечается, что несмотря на наступившую эпоху цифровизации и создания виртуальных моделей объектов, физическое прототипирование является зачастую безальтернативным или более эффективным способом проверки конструкторско-технологических решений. Значительно упрощает процесс развитие технологий 3D-печати [4] для получения прототипов механических деталей. К сожалению, такая технология неприемлема для изготовления оптических элементов, в частности зеркал, так как не позволяет получить оптическую поверхность с необходимой точностью формы, требуемыми коэффициентами отражения и рассеяния излучения.

В целях существенного упрощения и ускорения процесса изготовления прототипов оптических зеркал был разработан следующий способ. Первоначально на металлообрабатывающих станках изготавливалась литейная форма. Ее конструкция должна обеспечивать получение заготовки зеркала с требуемыми геометрическими параметрами. Затем в литейную форму, нагретую до заданной температуры, заливался расплавленный сплав с низкой температурой плавления. В данном случае используется сплав Вуда [5]. Выбор сплава определялся доступностью материала, низкой ($68,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) температурой плавления и, как показали эксперименты, возможностью получения оптических поверхностей. Охлаждение литейной формы тоже осуществлялось по заданному режиму. Следует отметить, что сплав Вуда содержит кадмий, который является канцерогеном и оксид которого, особенно пары, вреден для здоровья. Поэтому все работы осуществлялись в специальном шкафу с вытяжкой.

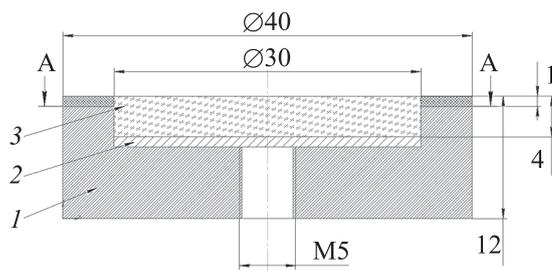


Рис. 1

На рис. 1 приведена конкретная конструкция литейной формы, где 1 — корпус, 2 — вкладыш, 3 — заготовка оптического зеркала после застывания. Резьбовое отверстие в корпусе и вкладыш служат для упрощения извлечения заготовки. После остывания конструкции корпус протачивался по линии А-А для возможности подвода инструмента к заготовке при последующем формообразовании. Диаметр заготовки 30 мм, толщина 4 мм.

Затем, с сохранением заготовки в оправе, осуществлялось формообразование плоской оптической поверхности методом алмазного микроточения (АМТ) [6] или традиционным полированием методом свободного притира. Формообразование методом АМТ осуществлялось на станке фрезерного типа [7] МО 600 ПЛ [8], а формообразование полированием — на ножном станке. После извлечения зеркала из корпуса были проведены измерения и получены следующие результаты: для поверхности после АМТ — $R_q = 85\text{ \AA}$, $N = 2,0$, $\Delta N = 0,5$; для поверхности после полирования — $R_q = 40\text{ \AA}$, $N = 1,0$, $\Delta N = 0,2$. Измерения проводились на апертуре 28 мм, контрольная длина волны составляла $0,6328\text{ мкм}$.

Следует учитывать, что при нанесении отражающих и защитных покрытий в вакуумной камере из-за низкой температуры плавления зеркала не допускается его нагрев до температур, при которых начнутся необратимые изменения формы оптической поверхности.

Для получения заготовок зеркал более сложной формы могут быть использованы технологии 3D-печати. На рис. 2 представлены литейная форма (а) и отлитая заготовка зеркала (б). Для изготовления литейной формы использовался 3D-принтер Prism pro v2 и Компас-3D для создания модели. Материал для отливки — ABS (акрилонитрил бутадиен стирол) фирмы REC, диапазон эксплуатационных температур от -40 до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, нетоксичный при нормальных условиях, прочность при растяжении поперек слоев $19,7\text{ МПа}$, широко используется в 3D-печати для прототипирования и создания демонстрационных моделей, обеспечивает хороший ком-

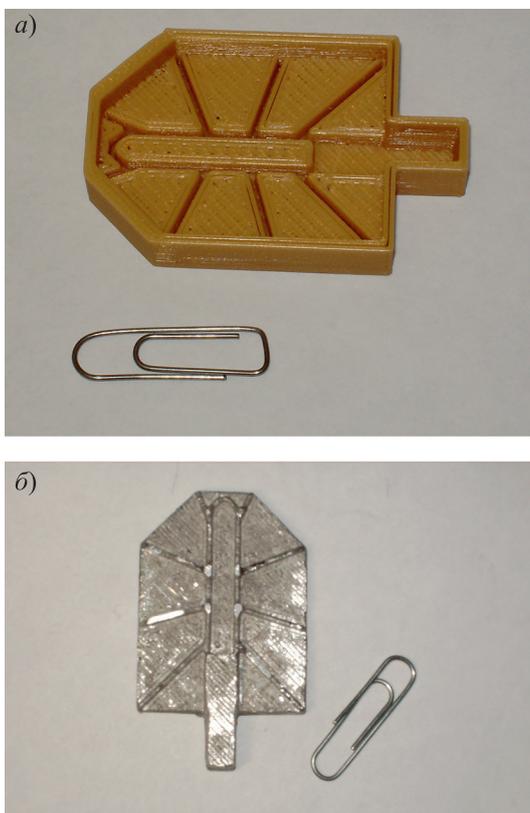


Рис. 2

промисс между сложностью изготовления (дороговизной оборудования, временем изготовления, количеством этапов производства и др.) и технически-эксплуатационными характеристиками изделия.

Изготовление заготовок зеркал возможно и из других легкосплавных материалов. Сплав Филдса имеет температуру плавления около 70 °С. Он значительно безопаснее, так как вместо кадмия в его составе используется индий, но является более дорогим и дефицитным. Сплавы Розе, Ньютона и различные оловянно-висмутовые сплавы имеют температуру плавления от 94 до 139 °С, что требует в случае изготовления литейных форм по технологиям 3D-печати более дорогостоящих оборудования и расходных материалов. Также следует отметить, что полируемость и возможность использования технологии АМТ применительно к этим сплавам не исследовались.

Вывод. Разработанный подход к изготовлению оптических зеркал позволяет оперативно получать их прототипы — по оценкам, пробное изготовление зеркал средней сложности (создание 3D-модели, отливка заготовки, АМТ) занимает 1-2 смены (8–16 рабочих часов) при корректной организации технологического процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медунецкий В. М., Солк С. В., Лебедев О. А. Опыт единичного и мелкосерийного производства оптико-механических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 7. С. 600–603.
2. Челпанов И. Б., Никифоров С. О., Кочева Т. В., Никифоров Б. С. Машинные дизайн-технологии быстрого прототипирования // Вестн. Бурят. гос. ун-та. 2010. № 9. С. 283–289.
3. Кabanov A. A. Прототипирование в разработке изделий ракетно-космической техники и систем их производства // Инженерный журн.: наука и инновации. 2022. № 8. С. 283–289.
4. Шегидевич А., Жукова А., Зайко А. Роль аддитивных технологий в авиации // Наука и инновации. 2019. Т. 199, № 9. С. 29–34.
5. Ремизов А. Л., Дерябин А. А., Халилов М. А. Анализ возможности применения низкотемпературных сплавов в качестве вспомогательного слоя между пьезоэлектрическим преобразователем и объектом контроля со сложной геометрической поверхностью // Изв. вузов. Машиностроение. 2016. Т. 678, № 9. С. 39–44.
6. Медунецкий В. М., Солк С. В. Опыт применения и перспективы технологии алмазного микроточения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. Т. 89, № 1. С. 165–170.
7. Solk S., Shevtsov S., Iakovlev A. Designing of optical elements manufactured by diamond turning // SPIE. 2000. Vol. 4231. P. 181–188.
8. Справочник технолога-оптика / Под ред. М. А. Окатова. СПб: Политехника, 2004. 679 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Сергей Вольдемарович Солк** — д-р техн. наук; НИИ оптико-электронного приборостроения; заместитель начальника отдела; E-mail: solk@sbor.net
- Владимир Сергеевич Шевцов** — НИИ оптико-электронного приборостроения; инженер-программист; E-mail: shevtsovvs@nioep.ru

Поступила в редакцию 23.03.2023; одобрена после рецензирования 14.02.2024; принята к публикации 22.03.2024.

REFERENCES

1. Medunetsky V. M., Solk S. V., Lebedev O. A. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 7(59), pp. 600–603. (in Russ.)
2. Chelpanov I. B., Nikiforov S. O., Kocheva T. V. Nikiforov B. S. *Bulletin of Buryat State University*, 2010, no. 9, pp. 283–289. (in Russ.)
3. Kabanov A. A. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, no. 8, pp. 283–289. (in Russ.)
4. Shegidzevich A., Zhukova H., Zaiko A. *Science and Innovation*, 2019, no. 9(199), pp. 29–34. (in Russ.)

5. Remizov A. L., Deryabin A. A., Khalilov M. A. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2016, no. 9(678), pp. 39–44. (in Russ.)
6. Medunetsky V. M., Solk S. V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 1(89), pp. 165–170. (in Russ.)
7. Solk S., Shevtsov S., Iakovlev A. *SPIE*, 2000, vol. 4231, pp. 181–188.
8. Okatov M. A., ed. *Spravochnik tekhnologa-optika (Optical Technologist's Handbook)*, St. Petersburg, 2004, 679 p. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

Viktor M. Medunetskiy	—	Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Professor; E-mail: vm57med@yandex.ru
Sergey V. Solk	—	Dr. Sci.; Scientific-Research Institute of Opto-Electronic Instrumentation; Deputy Head of Department; E-mail: solk@sbor.net
Vladimir S. Shevtsov	—	Dr. Sci.; Scientific-Research Institute of Opto-Electronic Instrumentation; Engineer-Programmer; E-mail: shevtsovvs@nioep.ru

Received 23.03.2023; approved after reviewing 14.02.2024; accepted for publication 22.03.2024.