

ISSN 2500—0381  
Электронная версия

ISSN 0021—3454  
Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

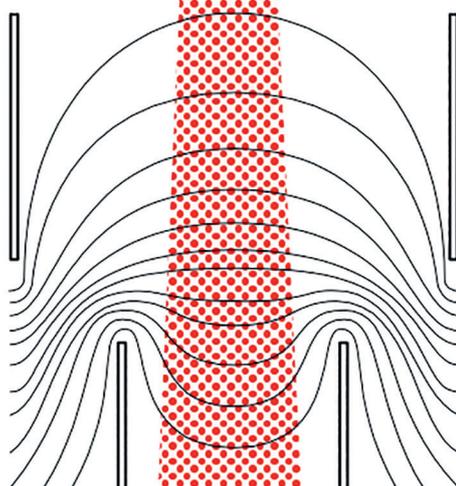
# П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ **10**

Т. 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 Л. Г. Позднякова*

*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/>*

---

*Подписано в печать 31.10.2024 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](mailto: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](mailto: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

### ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

- Коробейников А. Г. Обнаружение аномалий в данных из INTERMAGNET при помощи графовой нейронной сети ..... 817

### ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

- Ефремова Е. С., Солдаткин В. А., Солдаткин В. М. Погрешности каналов системы измерения воздушных параметров движения летательных аппаратов с интегрированным фюзеляжным приемником потока ..... 822

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- Мусалимов В. М., Перепелкина С. Ю., Ерофеев М. А. Моделирование поперечного касательного взаимодействия стопы с опорной поверхностью ..... 831
- Ишимов Д. Е., Демидов Н. Н., Седакова Е. Б. Модельная оценка возможности применения ступенчатой трансмиссии в электромобиле ..... 837

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

- Неструев Д. С., Борзов Д. Б. Алгоритмы перераспределения ролей в беспроводных вычислительных кластерах ..... 844

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

- Старикова В. А., Перминов А. В. Влияние материала инициатора на процесс возникновения оптического пробоя в оптическом волокне ..... 853

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРИБОРОВ

- Борисов Д. А., Жуков А. А. Разработка системы диагностики гибридной силовой установки легкого летательного аппарата ..... 867
- Медунецкий В. М., Абрамчук М. В., Перепелкина С. Ю. Использование полимерных композиционных материалов в цилиндрических зубчатых передачах ..... 878
- Шилин А. Н., Шилин А. А., Атаманюк Р. Г. Бесцентровая схема управления профилями крупногабаритных оболочек в процессе их формирования ..... 887

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Ваддах Али, Колюбин С. А. Управление манипуляторами с настройкой импедансных регуляторов на основе моделей сенсорно-моторных навыков ..... 893
- Майоров Е. Е. Спектрофотометрический метод исследования содержащих метакриловые мономеры композитов ..... 899

## 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 Lidia G. Pozdniakova*

*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

OCTOBER 2024

№ 10

## CONTENTS

### INFORMATICS AND INFORMATION PROCESSES

- Korobeynikov A. G.** Detecting Anomalies in Intermagnet Data Using Graph Neural Network . . . . . 817

### INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

- Efremova E. S., Soldatkin V. V., Soldatkin V. M.** Channel Error of the Air Motion Parameters Measurement System for Aircraft with an Integrated Fuselage Flow Receiver . . . . . 822

### COMPUTER SIMULATION AND DESIGN AUTOMATION

- Musalimov V. M., Perepelkina S. Yu., Erofeev M. A.** Modeling of Transverse Tangential Interaction of the Foot with the Supporting Surface . . . . . 831

- Ishimov D. E., Demidov N. N., Sedakova E. B.** Model Assessment of the Possibility of Using a Stepped Transmission in an Electric Vehicle . . . . . 837

### COMPUTING SYSTEMS AND THEIR ELEMENTS

- Nestruev D. S., Borzov D. B.** Algorithm for Redistributing Roles in Wireless Computing Clusters . . . . . 844

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

- Starikova V. A., Perminov A. V.** Influence of Initiator Material on the Process of Optical Breakdown in Optical Fiber . . . . . 853

### DESIGN AND PRODUCTION TECHNOLOGY OF INSTRUMENTS

- Borisov D. A., Zhukov A. A.** Development of a Diagnostic System for a Hybrid Power Plant of a Light Aircraft . . . . . 867

- Shilin A. N., Shilin A. A., Atamanyuk R. G.** Centerless Control Scheme for Large-sized Shell Profiles During Their Formation . . . . . 878

- Medunetsky V. M., Abramchuk M. V., Perepelkina S. Yu., Tsvetkova M. H., Lovlin S. Yu.** Use of Polymer Composite Materials in Spur Gear . . . . . 887

### BRIEF NOTES

- Waddah Ali, Kolyubin S. A.** Variable Impedance Learning Control for Robotic Arms from GMR-Encoded Behavior Priors . . . . . 893

- Maiorov E. E.** Spectrophotometric Method for Studying Composites Containing Methacrylic Monomers . . . . . 899

## 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*

### ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛИЙ В ДАННЫХ ИЗ СЕТИ INTERMAGNET ПРИ ПОМОЩИ ГРАФОВОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

**А. Г. Коробейников**

*Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия*

*Korobeynikov\_A\_G@mail.ru*

**Аннотация.** Применение современных цифровых информационных технологий, таких как Data Mining, Data Science и Big Data, вызвало экспоненциальный рост объема данных, позволяющих получать новые знания в различных предметных областях на базе предоставленной информации. В связи с этим задачи, связанные с предобработкой, интеллектуальным анализом, визуализацией больших наборов данных, приобрели особую актуальность. С использованием методов интеллектуального анализа Unsupervised learning решается задача обнаружения аномалий (выбросов) в массивах данных, полученных от магнитной обсерватории Lycksele, входящей в международную сеть INTERMAGNET. Поскольку аномалии отражают изменения в геомагнитном поле Земли, их информативность высока, что придает решению этой задачи большую научную и практическую ценность. Аномалии в обозначенных данных достаточно нечасты, поэтому могут быть обнаружены только в большом объеме обрабатываемой информации. Представлены результаты обнаружения аномалий при помощи графовой нейронной сети. В качестве программного инструментария использовалась система MatLab.

**Ключевые слова:** *Big Data, Data Mining, Datastore, INTERMAGNET, MatLab, Unsupervised learning, геомагнитные возмущения, графовая нейронная сеть*

**Благодарность:** работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-27-00011.

**Ссылка для цитирования:** *Коробейников А. Г. Обнаружение аномалий в данных из сети INTERMAGNET при помощи графовой нейронной сети // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 817–821. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-817-821.*

### DETECTING ANOMALIES IN INTERMAGNET DATA USING GRAPH NEURAL NETWORK

**A. G. Korobeynikov**

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the RAS,  
St. Petersburg branch, St. Petersburg, Russia*

*Korobeynikov\_A\_G@mail.ru*

**Abstract.** The use of modern digital information technologies, such as Data Mining, Data Science and Big Data, has caused an exponential growth in the volume of data, allowing to obtain new knowledge in various subject areas based on the information provided. In this regard, tasks related to pre-processing, intellectual analysis, visualization of large data sets have become especially relevant. Using the methods of intelligent analysis Unsupervised learning, the problem of detecting anomalies (outliers) in data arrays obtained from the Lycksele magnetic observatory, which is part of the international network INTERMAGNET, is solved. Since anomalies reflect changes in the Earth's geomagnetic field, they are highly informative, which gives the solution to this problem great scientific and practical value. Anomalies in the designated data are not frequent enough, so they can be detected only in a large volume of processed information. The results of detecting anomalies using a graph neural network are presented. The MATLAB system is used as a software tool.

**Keywords:** Big Data, Data Mining, Datastore, INTERMAGNET, MATLAB, unsupervised learning, geomagnetic disturbances, graph neural network

**Acknowledgments:** The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-27-00011.

**For citation:** Korobeynikov A. G. Detecting anomalies in Intermagnet data using graph neural network. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 10. P. 817–821 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-817-821.

**Введение.** Интенсивное развитие цифровых информационных технологий (ИТ) помогает повышать эффективность в различных сферах деятельности современного общества [1, 2]. Одним из приоритетных направлений развития является создание новых методов работы с данными большого объема. Современные цифровые информационные технологии, такие как Data Mining, Data Science и Big Data, позволяют получать новые знания в различных предметных областях на базе обработки большого объема данных. Специфика больших данных ограничивает возможности применения традиционных методов (приложений) для обработки данных и управления ими.

Для получения значимых результатов требуются обработка больших данных (при помощи технологии Big Data) и извлечение ценных знаний (при помощи технологии Data Mining).

С использованием методов интеллектуального анализа Unsupervised learning, входящих в технологию Data Science, в настоящей работе решается задача обнаружения аномалий (Anomaly Detection) — значительных изменений параметров геомагнитного поля Земли (ГМП) в данных, полученных от входящей в международную сеть INTERMAGNET магнитной обсерватории Luycksele [3]. Решение задачи происходит при помощи обучения графовой нейронной сети (Graph Neural Network, GNN) с последующей обработкой GNN исходных данных [4, 5]. Высокая информативность аномалий придает решению данной задачи большую научную и практическую ценность. Необходимо отметить, что аномалии в обозначенных данных возникают нечасто, поэтому могут быть обнаружены только в случае большого объема обрабатываемой информации.

Поставленная задача решалась в системе MatLab (отметим, что реализованные в рамках MatLab технологии принято называть методами), позволяющей решать задачи в самых разных предметных областях [6–9].

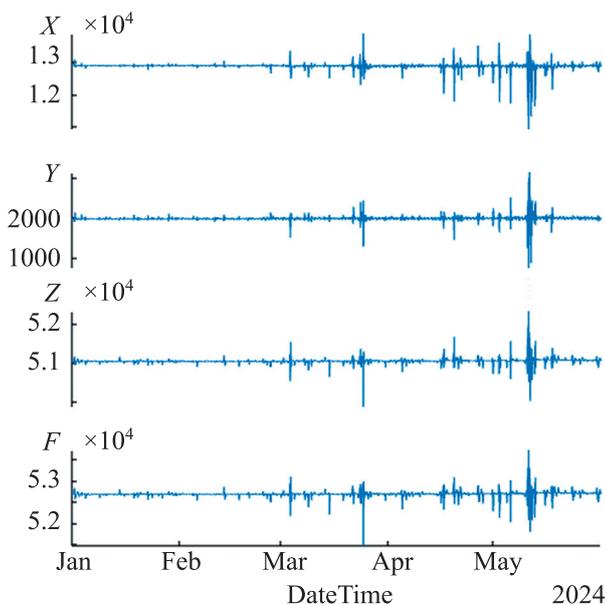


Рис. 1

**Подготовка данных для обучения.** Файлы с исходными данными о состоянии ГМП в период с 1 января по 31 мая 2024 года с частотой дискретизации в 1 Гц получены из сети INTERMAGNET.\* В файлах содержатся четыре столбца значений:  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  — компоненты вектора ГМП и  $F$  — модуль вектора ГМП. Из-за большого объема эти данные не помещаются в оперативную память. Поэтому требуется применение специальных средств, таких как Datastore (хранилище данных): после небольшой модификации представленного в [4] кода на MatLab можно получить график исходных данных (рис. 1; представленный набор данных содержит в каждом столбце значений  $N = 13\,132\,800$  измерений).

При подготовке к обучению GNN обнаружению аномалий сначала исходные данные нормализуются в соответствии с рассчитанными статистическими характеристиками, а затем создается обучающая выборка — в ходе про-

\* <https://www.intermagnet.org>.

веденных вычислительных экспериментов выбирались первые 40 % данных [10].

При расчете прогноза наличия аномалии используется модель графовой сети, основанная на внимании (Graph Attention Network), со скользящим окном 40 [11]. Размер минипакетов (mini-batches) обучающих данных и управления ими выбран равным 5000 элементов, а число эпох обучения — 5. Вычисление прогнозов осуществлялось перебором минипакетов данных с использованием методов Datastore.

**Обучение GNN.** Процесс обучения GNN проиллюстрирован на рис. 2, на его успешность указывает характер снижения величины ошибок прогноза ( $Loss = 0,0265$  у.е.) с увеличением номера итерации  $I$ .

Можно отметить, что ввиду использования неразмеченного набора данных применялись методы машинного обучения Unsupervised learning (обучение без учителя) [12]. На рис. 3 проиллюстрировано изменение величины магнитного поля Земли  $B$  во времени на этапах обучения, проверки (валидации) и тестирования сети. Превышение порогового значения (выброс) соответствует обнаружению в данных аномалии.

На рис. 4, а представлена гистограмма распределения частоты обнаружения аномалий для каждого столбца данных, на рис. 4, б — данные временного ряда столбца  $X$ , содержащего самое большое количество аномалий.

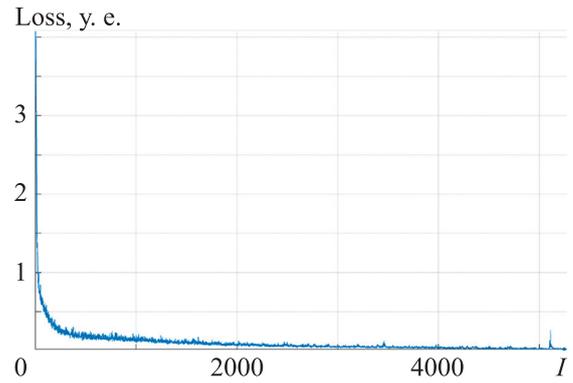


Рис. 2

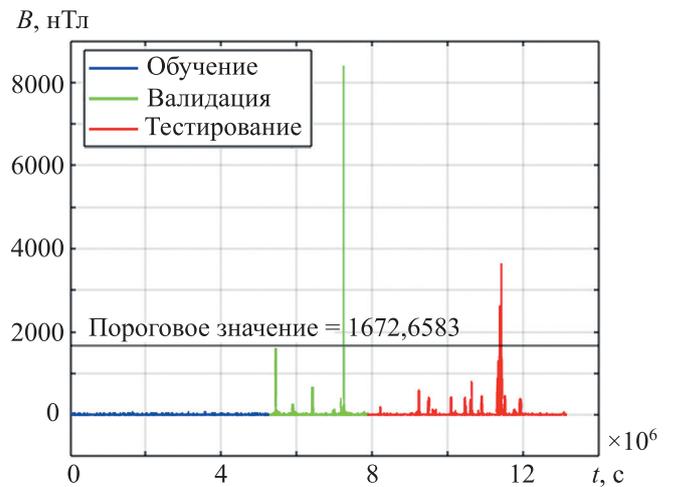


Рис. 3

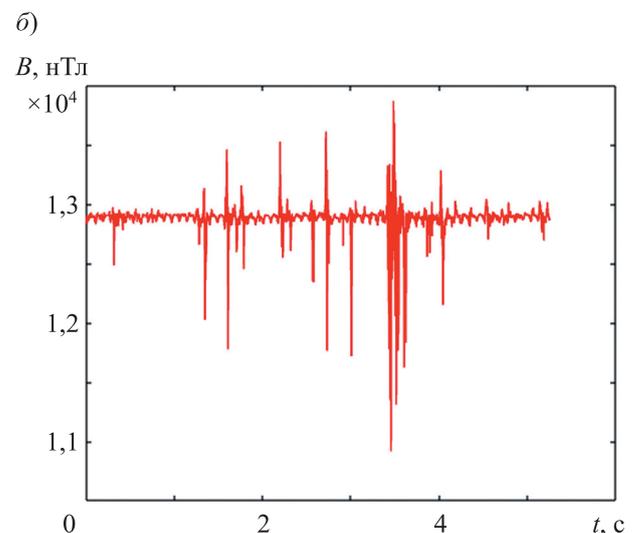
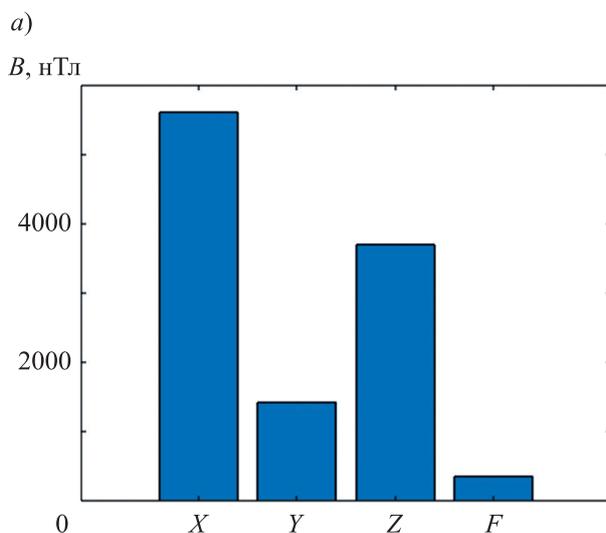


Рис. 4

**Заключение.** Таким образом, в настоящей работе предложен и реализован подход к решению задачи обнаружения аномалий при помощи графовой нейронной сети, основанной на внимании. Продуктивность данного подхода показана на примере работы с большими данными, полученными из INTERMAGNET. Из рис. 1 видно, что период с 10 по 12 мая 2024 г. характеризуется сильным геомагнитным возмущением (можно отметить, что данный факт подтверждается и из других независимых источников, например, сайта ИЗМИРАН <https://geodata.izmiran.ru/indexb.php>). Предложенный подход позволяет фиксировать такие события без участия человека при помощи привлечения методов искусственного интеллекта (GNN, Big Data) для автоматизации процесса выделения аномалий в различных наборах данных. Полученный научно-практический результат показывает, что, применяя систему MatLab, можно достаточно эффективно работать с технологиями Big Data, которые позволяют успешно решать геофизические задачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Апельцин Л.* Data Science в действии. СПб: Питер, 2023. 736 с.
2. *Остроух А. В., Николаев А. Б.* Интеллектуальные информационные системы и технологии. СПб: Лань, 2023. 308 с.
3. *Коробейников А. Г.* Применение методов Big Data для сравнения данных геомагнитных обсерваторий сети INTERMAGNET // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 12. С. 993–1001.
4. *Scarselli F., Gori M., Tsoi A., Hagenbuchner M., & Monfardini G.* The graph neural network model // IEEE Transactions on Neural Networks. 2009. Vol. 20, N 1. P. 61–80. <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=10501&context=infopapers>.
5. *Wu Z., Pan S., Chen F. et al.* Comprehensive Survey on Graph Neural Networks // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2021. Vol. 32, N 1. P. 4–24. DOI: 10.1109/TNNLS.2020.2978386.
6. *Zakoldaev D. A., Korobeynikov A. G., Shukalov A. V., Zharinov I. O.* Workstations Industry 4.0 for Instrument Manufacturing // IOP Conf. Ser. Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 665, N 1. P. 012015. DOI: 10.1088/1757-899X/665/1/012015.
7. *Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г., Дукельский К. В.* Метод численной оценки технической интероперабельности // Кибернетика и программирование. 2017. № 3. С. 23–38.
8. *Коробейников А. Г., Гришенцев А. Ю., Святкина М. Н.* Применение интеллектуальных агентов магнитных измерений для мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры // Кибернетика и программирование. 2013. № 3. С. 9–20.
9. *Коробейников А. Г., Кудрин П. А., Сидоркина И. Г.* Алгоритм распознавания трехмерных изображений с высокой детализацией // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2010. Т. 2, № 9. С. 91–98.
10. *Романов П. С., Романова И. П.* Системы искусственного интеллекта. Моделирование нейронных сетей в системе MATLAB. Лабораторный практикум: уч. пос. для вузов. СПб: Лань, 2024. 140 с.
11. *Sun C., Li C., Lin X. et al.* Attention-based graph neural networks: a survey // Artif. Intell. Rev. 2023. Vol. 56, Suppl. 2. P. 2263–2310. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10577-2>.
12. *Николенко С., Кадурич А., Архангельская Е.* Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб: Питер, 2020. 480 с.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Анатолий Григорьевич Коробейников** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук: зам. директора по науке; E-mail: Korobeynikov\_A\_G@mail.ru

Поступила в редакцию 18.06.24; одобрена после рецензирования 24.06.24; принята к публикации 23.08.24.

## REFERENCES

1. Apeltsin L. *Data Science Bookcamp*, Simon and Schuster, 2021, 704 p.
2. Ostroukh A.V., Nikolayev A.B. *Intellektual'nyye informatsionnyye sistemy i tekhnologii* (Intelligent Information Systems and Technologies), St. Petersburg, 2023, 308 p. (in Russ.)
3. Korobeynikov A.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 12(66), pp. 993–1001, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-12-993-1001. (in Russ.)
4. Scarselli F., Gori M., Tsoi A., Hagenbuchner M. & Monfardini G. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2009, no. 1(20), pp. 61–80, <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=10501&context=infopapers>.
5. Wu Z., Pan S., Chen F. et al. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2021, no. 1(32), pp. 4–24, DOI: 10.1109/TNNLS.2020.2978386.
6. Zakoldaev D.A., Korobeynikov A.G., Shukalov A.V., Zharinov I.O. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2019, no. 1(665), pp. 012015, DOI: 10.1088/1757-899X/665/1/012015.
7. Grishentsev A.Yu., Korobeinikov A.G., Dukelskiy K.V. *Cybernetics and programming*, 2017, no. 3, pp. 23–38. (in Russ.)
8. Korobeinikov A.G., Grishentsev A.Yu., Svyatkina M.N. *Cybernetics and programming*, 2013, no. 3, pp. 9–20. (in Russ.)
9. Korobeinikov A.G., Kudrin R.A., Sidorkina I.G. *Vestnik of Mari State Technical University. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems*, 2010, no. 2(9), pp. 91–98. (in Russ.)
10. Romanov P.S., Romanova I.P. *Sistemy iskusstvennogo intellekta. Modelirovaniye neyronnykh setey v sisteme MATLAB. Laboratornyy praktikum* (Artificial Intelligence Systems. Modeling Neural Networks in MATLAB. Laboratory Workshop), St. Petersburg, 2024, 140 p. (in Russ.)
11. Sun C., Li C., Lin X. et al. *Artif. Intell. Rev.*, 2023, no. 2(56), pp. 2263–2310, <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10577-2>.
12. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. *Glubokoye obuchenije. Pogruzheniye v mir neyronnykh setey* (Deep Learning. Immersion into the World of Neural Networks), St. Petersburg, 2020, 480 p. (in Russ.)

## DATA ON AUTHOR

**Anatoly G. Korobeynikov**

— Dr. Sci., Professor; Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the RAS, St. Petersburg branch; Deputy Director for Science; E-mail: Korobeynikov\_A\_G@mail.ru

Received 18.06.24; approved after reviewing 24.06.24; accepted for publication 23.08.24.

**ПОГРЕШНОСТИ КАНАЛОВ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ФЮЗЕЛЯЖНЫМ ПРИЕМНИКОМ ПОТОКА****Е. С. Ефремова, В. В. Солдаткин, В. М. Солдаткин\****Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия**\* w-soldatkin@mail.ru*

**Аннотация.** Отмечена актуальность задачи пополнения арсенала средств измерения воздушных параметров движения летательных аппаратов (ЛА) относительно окружающей воздушной среды. Эти средства должны характеризоваться простотой конструкции, малыми массой и стоимостью, возможностью применения на малоразмерных и сверхлегких самолетах, пилотируемых, беспилотных и дистанционно пилотируемых ЛА самолетной схемы. Указаны достоинства системы измерения воздушных параметров движения ЛА относительно окружающей среды с одним интегрированным невыступающим фюзеляжным приемником набегающего воздушного потока, с встроенными преобразователями первичных информативных параметров в электрические сигналы и встроенным вычислителем, формирующим выходные цифровые сигналы системы. Отмечена актуальность исследования инструментальных и методических погрешностей каналов системы. Разработаны аналитические модели инструментальных погрешностей каналов системы измерения воздушных параметров движения ЛА с интегрированным фюзеляжным приемником потока, позволяющие исследовать влияние погрешностей функциональных элементов на инструментальную погрешность измерительных каналов системы, проводить выбор элементной базы системы. Получены аналитические модели, проведена оценка методических погрешностей каналов системы измерения воздушных параметров движения ЛА с интегрированным фюзеляжным приемником потока, обусловленных искажением набегающего воздушного потока в месте установки приемника потока при движении ЛА и обтекании фюзеляжа, указано направление снижения методических погрешностей каналов системы.

**Ключевые слова:** *воздушные параметры, система измерения, фюзеляжный приемник, инструментальные, методические погрешности*

**Ссылка для цитирования:** *Ефремова Е. С., Солдаткин В. В., Солдаткин В. М. Погрешности каналов системы измерения воздушных параметров движения летательных аппаратов с интегрированным фюзеляжным приемником потока // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 822–830. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-822-830.*

**CHANNEL ERROR OF THE AIR MOTION PARAMETERS MEASUREMENT SYSTEM FOR AIRCRAFT WITH AN INTEGRATED FUSELAGE FLOW RECEIVER****E. S. Efremova, V. V. Soldatkin, V. M. Soldatkin\****A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia**\* w-soldatkin@mail.ru*

**Abstract.** The relevance of the task of replenishing the arsenal of means for measuring air parameters of aircraft movement relative to the surrounding air environment is noted. These means should be characterized by a simple design, low weight and cost, the possibility of use on small-sized and ultra-light aircraft, manned, unmanned and remotely piloted aircraft of the aircraft configuration. The advantages of the system for measuring the air parameters of aircraft movement relative to the environment with one integrated non-protruding fuselage receiver of the incident air flow, with built-in converters of primary information parameters into electrical signals and a built-in computer that generates the output digital signals of the system are indicated. The relevance of studying the instrumental and methodological errors of the system channels is noted. Analytical models of instrumental errors of the system channels for measuring airborne parameters

of aircraft movement with an integrated fuselage flow receiver are developed, allowing one to study the influence of errors of functional elements on the instrumental error of the measuring channels of the system and to select the element base of the system. Analytical models are obtained, an assessment is made of the methodological errors of the channels of the system for measuring the air parameters of aircraft movement with an integrated fuselage flow receiver, caused by the distortion of the incoming air flow at the installation site of the flow receiver during aircraft movement and flow around the fuselage, and a direction for reducing the methodological errors of the system channels is indicated.

**Keywords:** air parameters, measurement system, fuselage receiver, instrumental and methodological errors

**For citation:** Efremova E. S., Soldatkin V. V., Soldatkin V. M. Channel error of the air motion parameters measurement system for aircraft with an integrated fuselage flow receiver. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 10. P. 822–830 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-822-830.

**Введение.** Движение самолетов и широкого класса летательных аппаратов (ЛА) происходит в пределах атмосферы. Для пилотирования, автоматического управления и предупреждения опасных режимов полета необходима достоверная информация об истинной воздушной скорости и аэродинамических углах атаки и скольжения, о приборной скорости и числе Маха, барометрической высоте и вертикальной скорости, плотности и других воздушных параметрах движения ЛА относительно окружающей среды [1–3].

Для измерения воздушных параметров полета ЛА широко применяются системы воздушных сигналов (СВС), построенные на основе аэрометрического и флюгерного методов контроля параметров набегающего воздушного потока. При этом используются распределенные по правому и левому борту фюзеляжа и вынесенные в набегающий воздушный поток приемники статического давления, приемники полного давления или комбинированные приемники воздушных давлений, приемники температуры заторможенного набегающего потока, флюгерные датчики аэродинамических углов атаки и скольжения. Указанные приемники и датчики пневмопроводами и электрическими кабелями связаны с находящимся на борту ЛА вычислителем, определяющим воздушные параметры движения ЛА относительно окружающей среды и формирующим выходные сигналы СВС [4–6]. Однако значительное количество разнесенных по фюзеляжу приемников и датчиков, пневмопроводов и электрических кабелей связи с бортовым вычислителем приводит к увеличению массы и стоимости и усложняет конструктивную схему СВС. Выступающие за обшивку фюзеляжа элементы приемников и датчиков влияют на аэродинамику движения ЛА и увеличивают заметность траектории его движения в атмосфере. Все это ограничивает применение таких традиционных СВС на сверхлегких и малоразмерных самолетах, на пилотируемых, беспилотных и дистанционно пилотируемых ЛА различного класса и назначения.

Разрабатываемые СВС, реализующие вихревой метод контроля параметров набегающего воздушного потока [7], а также ионно-меточный и ультразвуковой методы [8–10] с одним многофункциональным приемником набегающего потока и встроенным вычислителем, также не снимают все ограничения традиционных СВС, что обуславливает перспективность разработки и применения раскрываемой в работе [11] системы измерения воздушных параметров движения ЛА с неподвижным интегрированным невыступающим фюзеляжным приемником потока. В настоящей статье приводятся модели составляющих погрешностей измерительных каналов системы измерения воздушных параметров движения ЛА с интегрированным фюзеляжным приемником потока и выполняется исследование этих моделей.

Как показано в работах [11–13], измеряемые воздушные параметры рассматриваемой системы — местный аэродинамический угол  $\alpha$  в плоскости расположения фюзеляжного приемника, истинная воздушная скорость  $V_b$ , приборная скорость  $V_{пр}$  и число Маха  $M$ , абсолютная (барометрическая) высота  $H$ , и вертикальная скорость  $V_y$ , температура  $T_H$  наружного воздуха и плотность  $\rho_H$  воздуха на текущей высоте  $H$  определяются по разработанным аналитическим моделям вида:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{\eta}{2} \frac{x_1 - x_2}{|x_1 + x_2|} \right) = f(x_1, x_2, \eta); \quad (1)$$

$$V_B = \sqrt{\frac{|x_1 + x_2| P_0 T_H}{\eta^2 \rho_0 P_0 P_H}} = f(x_1, x_2, T_H, P_H, \eta); \quad (2)$$

$$V_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{|x_1 + x_2|}{\eta^2 \rho_0}} = f(x_1, x_2, \eta); \quad (3)$$

$$M = \sqrt{\frac{|x_1 + x_2| P_0}{\eta^2 k g R \rho_0 P_0 P_H}} = f(x_1, x_2, P_H, \eta); \quad (4)$$

$$T_H = \frac{T_\tau}{1 + 0,2\xi M^2} = f(T_\tau, M); \quad (5)$$

$$(-2000 < H \leq 11\,000 \text{ м}) = f(P_H); H = \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right]; \quad (6)$$

$$(11\,000 < H \leq 20\,000 \text{ м}) = f(P_H); H = H_{11} + P T_{11} \ln \frac{P_{11}}{P_H}; \quad (7)$$

- в диапазоне высот от  $-2000$  до  $11\,000$  м

$$V_y = \frac{dH}{dt} = -\frac{T_0 R}{P_0^{\tau R}} P_H^{\tau R - 1} = f(P_H); \quad (8)$$

- в диапазоне высот от  $11\,000$  до  $20\,000$  м

$$V_y = \frac{dH}{dt} = \frac{R T_{11}}{P_{11} P_H} = f(P_H); \quad (9)$$

$$\rho_H = \rho_0 \frac{P_H T_0}{P_0 T_H} = f(P_H, T_H), \quad (10)$$

где  $x_1 = P_1 - P_H$ ,  $x_2 = P_2 - P_H$  — информативные перепады давлений измерительных каналов системы;  $P_H$  — статическое давление набегающего воздушного потока, воспринимаемое на скользящей поверхности интегрированного фюзеляжного приемника;  $P_1, P_2$  — давления, воспринимаемые на скользящей поверхности фюзеляжного приемника вблизи аэродинамического компенсатора погрешностей восприятия статического давления  $P_H$ , обусловленных искажением невозмущенного статического давления набегающего воздушного потока при движении и обтекании фюзеляжа ЛА;  $\varphi_0$  — угол установки отверстий для восприятия давлений  $P_1$  и  $P_2$  относительно оси фюзеляжного приемника, параллельной продольной оси ЛА ( $\varphi_0 = 45^\circ$ );

$\eta = \left( \frac{r_0}{r} \right)^2$  — конструктивный параметр, определяющий  $r$  расположение отверстий для восприятия давлений  $P_1$  и  $P_2$  относительно аэродинамического компенсатора;  $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$ ,  $P_0 = 101\,325 \text{ Па}$  и  $T_0 = 288,15 \text{ К}$  — массовая плотность, статическое давление и абсолютная температура воздуха на абсолютной (барометрической) высоте  $H = 0$  стандартной атмосферы;  $T_H$  — абсолютная температура на текущей барометрической высоте  $H$ ;  $T_\tau$  — температура торможения набегающего воздушного потока;  $\xi$  — коэффициент торможения набегающего воздушного потока, который находится в пределах  $0,98-1,02$ ;  $k = 1,4$  — показатель адиабаты воздуха;  $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения;  $R = 29,27125 \text{ м/К}$  — газовая постоянная;  $\tau = 0,0065 \text{ К/м}$  — температурный градиент;  $P_{11} = 22\,632 \text{ Па}$  и  $T_{11} = 216,65 \text{ К}$  — давление и абсолютная температура воздуха на высоте  $H_{11} = 11\,000 \text{ м}$ .

Приведенные аналитические модели являются базой для определения инструментальных погрешностей каналов системы измерения воздушных параметров движения с интегрированным фюзеляжным приемником потока.

Как показывает анализ, инструментальные погрешности каналов системы измерения воздушных параметров движения ЛА определяются погрешностями функциональных элементов, используемых для преобразования  $x_1, x_2, P_H, T_T$  в электрические сигналы, и вычислителя, формирующего выходные сигналы системы, а также качеством изготовления плиточного приемника с аэродинамическим компенсатором.

В работе [7] приведена методика определения результирующей инструментальной погрешности измерительно-вычислительных каналов при известном уравнении для вычисления заданного выходного сигнала  $Y$  и известных входных сигналах  $x_1, x_2, \dots, x_n$  измерительно-вычислительного канала, например, вида

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (11)$$

Используя линейное приближение, для известных систематических составляющих инструментальных погрешностей  $\Delta x_i$  измерения входных сигналов  $x_i$  результирующую систематическую погрешность  $\Delta Y$  измерительно-вычислительного канала можно представить как

$$\Delta Y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i + \Delta_{п.о}, \quad (12)$$

где  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  — в общем случае размерные функции, характеризующие влияние соответствующей погрешности  $\Delta x_i$  измерения параметра  $x_i$  на результирующую погрешность  $\Delta Y$  измерительного канала;  $\Delta_{п.о}$  — систематическая погрешность канала преобразования и обработки входных сигналов.

Дисперсия  $\sigma_{\Delta Y}^2$  результирующей инструментальной погрешности измерительно-вычислительного канала при нормальном законе распределения и известных среднеквадратических погрешностях  $\sigma_{\Delta x_i}$  измерения входных сигналов определяется по выражению вида

$$\sigma_{\Delta Y}^2 = \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{\Delta x_1}^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{\Delta x_2}^2 + \dots + \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{\Delta x_i}^2 + \sigma_{п.о}^2, \quad (13)$$

где  $\sigma_{п.о}^2$  — дисперсия погрешности канала преобразования и обработки входных сигналов  $x_i$ .

В соответствии с рассмотренной методикой, с использованием выражения (1), для определения местного аэродинамического угла  $\alpha$ , инструментальная погрешность  $\alpha_{и}$  измерительно-вычислительного канала системы измерения воздушных параметров движения с интегрированным фюзеляжным приемником определяется выражением

$$\Delta \alpha_{и} = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial f}{\partial \eta} \Delta \eta + \Delta_{п.о}, \quad (14)$$

где  $\Delta x_1, \Delta x_2$  и  $\Delta \eta$  — инструментальные погрешности используемых датчиков перепадов давлений  $x_1, x_2$  и технологический допуск на расположение отверстий для восприятия давлений  $P_1, P_2$ .

После подстановки выражений для частных производных аналитическая модель систематической инструментальной погрешности канала измерения местного аэродинамического угла будет иметь вид

$$\Delta \alpha_{и} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\eta}{2\sqrt{1 - \alpha_m^2 |x_1 + x_2|}} \left( \frac{x_2}{|x_1 + x_2|} \Delta x_1 - \frac{x_1}{|x_1 + x_2|} \Delta x_2 + \frac{1}{\eta} (x_1 - x_2) |x_1 + x_2| \Delta \eta \right) \right] + \Delta_{п.о}. \quad (15)$$

С использованием аналитической модели (2) для определения истинной воздушной скорости  $V_B$  получена аналитическая модель инструментальной погрешности  $\Delta V_{B,и}$  канала истинной воздушной скорости системы измерения воздушных параметров движения с интегрированным фюзеляжным приемником потока в виде

$$\Delta V_{в.и} = \frac{P_0}{2\sqrt{V_{в.и}}\rho_0 P_0} \left[ \frac{T_H}{\eta^2 P_H} \Delta x_1 + \frac{T_H}{\eta^2 P_H} \Delta x_2 - \frac{|x_1 + x_2|}{\eta^2 P_H} \Delta T_H - \frac{|x_1 + x_2|}{\eta^2 P_H} \Delta P_H - \frac{2|x_1 + x_2| T_H}{\eta^3 P_H} \Delta \eta \right] + \Delta_{п.о}. \quad (16)$$

В соответствии с моделями (3) и (4) определения приборной скорости  $V_{пр}$  и числа Маха  $M$  получены аналитические модели инструментальных погрешностей каналов приборной скорости  $\Delta V_{пр.и}$  и числа Маха  $\Delta M_{и}$ :

$$\Delta V_{пр.и} = \frac{1}{2\sqrt{V_{пр}}\rho_0 \eta^2} \left[ \Delta x_1 + \Delta x_2 - \frac{2|x_1 + x_2|}{\eta} \Delta \eta \right] + \Delta_{п.о}; \quad (17)$$

$$\Delta M_{и} = \frac{P_0}{2\sqrt{M}\rho_0 k g R} \left[ \frac{1}{\eta^2 P_H} \Delta x_1 + \frac{1}{\eta^2 P_H} \Delta x_2 - \frac{|x_1 + x_2|}{P_H^2} \Delta P_H - \frac{2|x_1 + x_2| T_H}{\eta^3 P_H} \Delta \eta \right] + \Delta_{п.о}. \quad (18)$$

Аналогично инструментальная погрешность  $\Delta H_{и}$  канала барометрической высоты системы измерений воздушных параметров на основе интегрированного фюзеляжного приемника потока в диапазоне высот до 11 000 м будет определяться аналитической моделью вида

$$\Delta H_{и} = -\frac{T_0 R}{P_0} \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R - 1} \Delta P_H = -\frac{T_0 R}{P_0^{\tau R}} \frac{1}{P_H^{1 - \tau R}} \Delta P_H + \Delta_{п.о}. \quad (19)$$

Инструментальная погрешность  $\Delta H_{и}$  канала барометрической высоты рассматриваемой системы в диапазоне  $11\,000 \leq H < 20\,000$  м будет определяться по аналитической модели

$$\Delta H_{и} = \frac{RT_{11}}{P_{11} P_H} \Delta P_H + \Delta_{п.о}. \quad (20)$$

Инструментальная погрешность  $\Delta T_{H.и}$  канала температуры наружного воздуха рассматриваемой системы будет определяться аналитической моделью вида

$$\Delta T_{H.и} = \frac{1}{1 + 0,2\xi M^2} \Delta T_T - \frac{0,43\xi M}{T_H(1 + 0,2\xi M^2)} \Delta M + \Delta_{п.о}; \quad (21)$$

В соответствии с выражениями (8), (9) аналитическая модель канала вертикальной скорости рассматриваемой системы будет определяться выражением

- в диапазоне высот от -2000 до 11 000 м

$$\Delta V_{y.и} = -\frac{(\tau R - 1) T_0 R}{P_0^{\tau R}} P_H^{\tau R - 1} \Delta P_H + \Delta_{п.о}; \quad (22)$$

- в диапазоне высот от 11 000 до 20 000 м

$$\Delta V_{y.и} = -\frac{RT_{11}}{P_{11} P_H} \Delta P_H + \Delta_{п.о}. \quad (23)$$

В соответствии с моделью (10) инструментальная погрешность  $\Delta \rho_{H.и}$  канала измерения плотности рассматриваемой системы будет определяться аналитической моделью

$$\Delta \rho_{H.и} = \frac{\rho_0 T_0}{P_0 P_H} \Delta P_H + \frac{R_H T_0}{P_0 T_H^2} \Delta T_H + \Delta_{п.о}. \quad (24)$$

Расчеты показали, что погрешности при использовании разработанных в рамках импортозамещения отечественных датчиков абсолютного давления, датчиков перепада давлений и температуры наружного воздуха погрешности каналов измерения воздушных параметров с интегрированным фюзеляжным приемником потока соответствуют по точности традиционным СВС, но позволяют уменьшить массу системы. Современные вычислители на базе PIC-контроллеров

со встроенными многоканальными аналого-цифровыми преобразователями и устройством связи с объектом также упрощают схему и снижают стоимость рассматриваемой системы, что свидетельствует о перспективах ее применения на сверхлегких и малоразмерных ЛА.

Основной причиной возникновения методических погрешностей рассматриваемой системы является отклонение статического давления  $P_M$ , воспринимаемого на скользящей поверхности фюзеляжного приемника, от статического давления  $P_H$  из-за искажения невозмущенного набегающего потока при движении ЛА и обтекания фюзеляжа. Статическое давление  $P_M$  в месте расположения отверстия для восприятия статического давления набегающего потока отличается от статического давления  $P_H$  невозмущенного потока на величину аэродинамического искажения  $\Delta P_a$ , пропорциональную скоростному напору  $q = \frac{\rho_H V_B^2}{2}$ , т. е.

$$P_M = P_H + \Delta P_a = P_H + K_p q, \quad (25)$$

где  $K_p = \frac{P_M}{q}$  — безразмерный коэффициент статического давления в месте расположения приемника на скользящей поверхности фюзеляжного приемника. Согласно Нормам летной годности самолетов [4], аэродинамическое искажение  $\Delta P_a$  восприятия статического давления бортовым приемником не должно превышать 5 % от скоростного напора, т. е.  $K_p \leq 0,05$ . Для этого на скользящей поверхности фюзеляжного приемника устанавливается аэродинамический компенсатор. Место установки аэродинамического компенсатора на скользящей поверхности фюзеляжного приемника и отверстия для восприятия статического давления  $P_H$  определяется по результатам летных испытаний для конкретного типа ЛА из условия обеспечения стабильности коэффициента  $K_p$  на характерных этапах и режимах полета с использованием технологии [14].

Остаточные методические аэродинамические погрешности каналов системы измерения воздушных параметров с интегрированным фюзеляжным приемником потока будут определяться по аналитическим моделям, приведенным ниже.

Методическая аэродинамическая погрешность  $\Delta H_M$  канала барометрической высоты определяется по аналитическим моделям вида

- в диапазоне высот от -2000 до 11 000 м

$$\Delta H_M = \left( \frac{T_0 K_p \rho_H V_B^2}{\tau} \right)^{\tau R} ; \quad (26)$$

- в диапазоне высот от 11 000 до 20 000 м

$$\Delta H_M = -RT_{11} \left( \ln \frac{P_{11}}{P_H + K_p \frac{\rho_H V_B^2}{2}} - \ln \frac{P_{11}}{P_H} \right)^{\tau R} . \quad (27)$$

Аналитическая модель методической аэродинамической погрешности  $\Delta V_{B.M}$  канала истинной воздушной скорости рассматриваемой системы в соответствии с выражением (2) будет иметь вид

$$\Delta V_{B.M} = \sqrt{\frac{1}{P_H + K_p \frac{\rho_H V_B^2}{2}} - \frac{1}{P_H}} . \quad (28)$$

Аналитическая модель методической аэродинамической погрешности  $\Delta M_M$  канала числа Маха в соответствии с выражением (4) будет определяться выражением

$$\Delta M_M = \sqrt{\frac{|x_1 + x_2| P_0 T_H}{\eta^2 \rho_0 T_0}} \sqrt{\frac{1}{P_H + K_p \frac{\rho_H V_B^2}{2}} - \frac{1}{P_H}} . \quad (29)$$

В соответствии с выражениями (8), (9) аналитические модели методических аэродинамических погрешностей  $\Delta V_{y,m}$  канала измерения вертикальной скорости имеют вид

- в диапазоне высот от  $-2000$  до  $11\,000$  м

$$\Delta V_{y,m} = -\frac{T_0 R}{P_0^{\tau R}} \left[ \left( P_H + K_p \frac{\rho_H V_B^2}{2} \right)^{\tau R - 1} - P_H^{\tau R - 1} \right]; \quad (30)$$

- в диапазоне высот от  $11\,000$  до  $20\,000$  м

$$\Delta V_{y,m} = - \left[ \frac{1}{P_H + K_p \frac{\rho_H V_B^2}{2}} - \frac{1}{P_H} \right]. \quad (31)$$

В соответствии с выражением (10) аналитическая модель методической аэродинамической погрешности  $\Delta \rho_{H,m}$  канала измерения плотности воздуха на текущей высоте  $H$  системы измерения воздушных параметров движения с интегрированным фюзеляжным приемником потока будет определяться выражением

$$\Delta \rho_{H,m} = \frac{\rho_0 T_0}{P_0 T_H} \left( P_H + K_p \frac{\rho_H V_B^2}{2} - P_H \right) = \frac{\rho_0 T_0}{P_0 T_H} K_p \frac{\rho_H V_B^2}{2}. \quad (32)$$

Полученные аналитические модели позволяют исследовать методические погрешности каналов системы измерения воздушных параметров движения ЛА в рабочих диапазонах эксплуатации. Остаточные методические погрешности каналов системы определяются по результатам летных испытаний образцов системы на данном типе ЛА и при конкретном месте установки интегрированного фюзеляжного приемника на характерных этапах и режимах полета с последующим введением поправок в алгоритмы вычисления воздушных параметров, которые обеспечивают уменьшение погрешности каналов системы.

Таким образом, проведенное исследование точности каналов системы измерения воздушных параметров движения с интегрированным фюзеляжным приемником потока позволило обосновать конкурентные преимущества предлагаемой системы, определяющие широкие перспективы ее применения на малоразмерных и сверхлегких самолетах, беспилотных, пилотируемых и дистанционно пилотируемых летательных аппаратах самолетной схемы.

Разработанные аналитические модели инструментальных погрешностей каналов рассматриваемой системы измерения воздушных параметров движения летательных аппаратов позволяют выполнять анализ и синтез измерительных каналов по критерию статической точности. Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что точность системы измерения воздушных параметров с интегрированным фюзеляжным приемником потока, при использовании современных отечественных датчиков первичной информации, соответствует точности традиционных систем воздушных сигналов, широко используемых в авиации.

Основные методические погрешности каналов системы измерения воздушных параметров с интегрированным фюзеляжным приемником потока обусловлены изменением статического давления, воспринимаемого фюзеляжным приемником, по сравнению со статическим давлением невозмущенного набегающего воздушного потока при движении ЛА и обтекании его фюзеляжа.

Полученные аналитические модели позволяют определить значения методических аэродинамических погрешностей каналов системы в рабочем диапазоне скоростей и высот и при превышении регламентируемых значений, выявленном по результатам летных испытаний на конкретном типе ЛА и при заданном местоположении фюзеляжного приемника — ввести поправки в разработанные аналитические модели вычисления воздушных параметров, обеспечивая высокую точность измерения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Н. Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса: Теория, проектирование, применение / Под ред. В. М. Солдаткина. М.: Машиностроение, 2009. 760 с.
2. Акимов А. Н., Воробьев В. В., Демченко О. Ф. и др. Особенности проектирования легких боевых и учебно-тренировочных самолетов / Под ред. Н. Н. Долженкова и В. А. Подобедова. М.: Машиностроение, 2005. 496 с.
3. Кравцов В. Г., Алексеев Н. К. Аэрометрия высотно-скоростных параметров летательных аппаратов // Приборы и системы управления: Управление, контроль, диагностика, 2000. № 8. С. 47–50.
4. Клюев Г. И., Макаров Н. Н., Солдаткин В. М., Ефимов И. П. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов / Под ред. В. А. Мишина. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2005. 509 с.
5. Авиационные приборы, измерительно-вычислительные системы и комплексы: Принципы построения, алгоритмы обработки информации, характеристики и погрешности / Под ред. В. М. Солдаткина. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. 526 с.
6. Солдаткин В. М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. 448 с.
7. Ефремова Е. С., Солдаткин В. М. Построение и погрешности системы воздушных сигналов на основе вихревого метода // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 8. С. 749–755.
8. Крылов Д. Л., Солдаткина Е. С. Система воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока // Изв. вузов. Авиационная техника, 2015. № 4. С. 48–54.
9. Ефремова Е. С., Никитин А. В., Солдаткин В. В., Солдаткин В. М. Теоретические основы разработки и исследования электронного датчика параметров вектора ветра воздушной скорости малоразмерного летательного аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 9. С. 774–781.
10. Ефремова Е. С., Мифтахов Б. И., Солдаткин В. В., Солдаткин В. М. Методические погрешности электронного датчика параметров вектора воздушной скорости летательного аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 6. С. 457–463.
11. Солдаткин В. М., Солдаткин В. В., Ефремова Е. С., Никитин А. В. Построение модели формирования и обработки сигналов системы измерения воздушных параметров движения с интегрированным фюзеляжным приемником потока // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 145–152.
12. Солдаткин В. М., Солдаткин В. В., Козловский Р. В., Козловский Г. В. Особенности построения, формирования и обработки информации системы воздушных сигналов самолета с фюзеляжными приемниками параметров набегающего потока // Вестн. КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. Т. 66, № 3. С. 91–96.
13. Солдаткин В. М., Солдаткин В. В., Ефремова Е. С., Никитин А. В. Теоретические основы построения системы воздушных сигналов с неподвижным невыступающим приемником // Изв. вузов. Авиационная техника, 2023. № 4. С. 153–158.
14. Харин Е. Г., Копылов И. А. Технологии летных испытаний бортового оборудования летательных аппаратов с применением комплекса бортовых тракторных измерений. М.: МАИ-ПРИНТ, 2012. 360 с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Елена Сергеевна Ефремова**

— канд. техн. наук; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, кафедра электронного приборостроения и менеджмента качества; доцент;  
E-mail: soldatkina1991@bk.ru

**Вячеслав Владимирович Солдаткин**

— д-р техн. наук, доцент; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, кафедра электронного приборостроения и менеджмента качества; профессор;  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

**Владимир Михайлович Солдаткин**

— д-р техн. наук, профессор; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, кафедра электронного приборостроения и менеджмента качества; профессор;  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Поступила в редакцию 08.04.24; одобрена после рецензирования 06.05.24; принята к публикации 23.08.24.

## REFERENCES

1. Makarov N.N. *Sistemy obespecheniya bezopasnosti funkcionirovaniya bortovogo ergaticheskogo kompleksa: Teoriya, proyektirovaniye, primeneniye* (Systems for Ensuring the Safety of the Functioning of the Onboard Ergatic Complex: Theory, Design, Application), Moscow, 2009, 760 p. (in Russ.)
2. Akimov A.N., Vorob'yev V.V., Demchenko O.F. et al. *Osobennosti proyektirovaniya legkikh boyevykh i uchebnotrenirovochnykh samoletov* (Features of the Design of Light Combat and Training Aircraft), Moscow, 2005, 496 p. (in Russ.)
3. Kravtsov V.G., Alekseev N.V. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2000, no. 8, pp. 47–50. (in Russ.)
4. Klyuev G.I., Makarov N.N., Soldatkin V.M., Efimov I.P. *Izmeriteli aerodinamicheskikh parametrov letatel'nykh apparatov* (Meters of Aerodynamic Parameters of Aircraft), Ulyanovsk, 2005, 509 p. (in Russ.)
5. Soldatkin V.M., Ganeev F.A., Soldatkin V.V., Nikitin A.V. *Aviatsionnyye pribory, izmeritel'no-vychislitel'nyye sistemy i komplekсы: Printsipy postroyeniya, algoritmy obrabotki informatsii, kharakteristiki i pogreshnosti* (Aviation Instruments, Measuring and Computing Systems and Complexes: Design Principles, Information Processing Algorithms, Characteristics and Errors), Kazan, 2014, 526 p. (in Russ.)
6. Soldatkin V.M. *Metody i sredstva izmereniya aerodinamicheskikh uglov letatel'nykh apparatov* (Methods and Means for Measuring the Aerodynamic Angles of Aircraft), Kazan, 2001, 448 p. (in Russ.)
7. Efremova E.S., Soldatkin V.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 8(63), pp. 749–755. (in Russ.)
8. Krylov D.L., Soldatkina E.S. *Russian Aeronautics*, 2015, no. 4, pp. 466–471.
9. Efremova E.S., Nikitin A.V., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 9(64), pp. 774–781. (in Russ.)
10. Efremova E.S., Miftakhov B.I., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 6(66), pp. 457–463. (in Russ.)
11. Soldatkin V.M., Soldatkin V.V., Efremova E.S., Nikitin A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2024, no. 2(67), pp. 145–152. (in Russ.)
12. Soldatkin V.M., Soldatkin V.V., Kozlovskii R.V., Kozlovskii G.V. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, 2023, no. 3(66), pp. 91–96. (in Russ.)
13. Soldatkin V.M., Soldatkin V.V., Efremova E.S., Nikitin A.V. *Russian Aeronautics*, 2023, no. 4, pp. 822–828.
14. Kharin E.G., Kopylov V.A. *Tekhnologii letnykh ispytaniy bortovogo oborudovaniya letatel'nykh apparatov s primeneniym kompleksa bortovykh trayektornykh izmereniy* (Technologies for Flight Tests of Onboard Equipment of Aircraft Using a Complex of On-Board Path Measurements), Moscow, 2012, 360 p. (in Russ.)

## DATA ON AUTHORS

- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>Elena S. Efremova</b>       | — PhD; A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University, Department of Electronic Instrumentation and Quality Management; Associate Professor; E-mail: soldatkina1991@bk.ru                |
| <b>Vyacheslav V. Soldatkin</b> | — Dr. Sci., Associate Professor; A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University, Department of Electronic Instrumentation and Quality Management; Professor; E-mail: w-soldatkin@mail.ru |
| <b>Vladimir M. Soldatkin</b>   | — Dr. Sci., Professor; A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University, Department of Electronic Instrumentation and Quality Management; Professor; E-mail: w-soldatkin@mail.ru           |

Received 08.04.24; approved after reviewing 06.05.24; accepted for publication 23.08.24.

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

## COMPUTER SIMULATION AND DESIGN AUTOMATION

УДК 004.94:531.4;612.766  
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-831-836

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО КАСАТЕЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТОПЫ С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В. М. Мусалимов<sup>1\*</sup>, С. Ю. Перепелкина<sup>2</sup>, М. А. Ерофеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем машиноведения Российской Академии наук, Санкт-Петербург, Россия*

\* *musvm@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Представлены результаты исследования процесса взаимодействия стопы с опорной поверхностью при ходьбе в фазах опоры и переката. В основу исследований положены экспериментальные данные сгибания–разгибания–пронации и супинации голеностопного сустава и реакций стопы при ходьбе. Основное внимание уделено анализу поперечной составляющей сил реакции. Установлено, что ударные составляющие сил реакций стопы целесообразно моделировать с помощью обобщенных функций Эрмита, а фазу переката стопы — скручиваемым эластичным армированным цилиндром. Результаты исследования используются при разработке мехатронных ортезов голеностопного сустава, они нацелены на разработку методов оценки и выявления плоскостопия на ранних этапах развития с перспективой построения карт реабилитации.

**Ключевые слова:** *биомеханический анализ движений, ударно-фрикционное взаимодействие, упруго-фрикционное взаимодействие, функция Эрмита*

**Благодарность:** работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 124041500009-8).

**Ссылка для цитирования:** *Мусалимов В. М., Перепелкина С. Ю., Ерофеев М. А. Моделирование поперечного касательного взаимодействия стопы с опорной поверхностью // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 831–836. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-831-836.*

### MODELING OF TRANSVERSE TANGENTIAL INTERACTION OF THE FOOT WITH THE SUPPORTING SURFACE

V. M. Musalimov<sup>1\*</sup>, S. Yu. Perepelkina<sup>2</sup>, M. A. Erofeev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, St. Petersburg, Russia*

\* *musvm@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

**Abstract.** Results of the study of the interaction of the foot with the support surface during walking in the phases of support and rolling are presented. The research is based on experimental data on flexion–extension–pronation and supination of the ankle joint and foot reactions when walking. The main attention is paid to the analysis of the transverse component of the reaction forces. It was found that it is advisable to model the shock components of the foot reaction forces using generalized Hermite functions, and the phase of the foot roll with a twisted elastic reinforced cylinder. The results of the study are used in the development of mechatronic ankle orthoses. They are aimed at developing methods for assessing and identifying flat feet in the early stages of development with the prospect of building rehabilitation maps.

**Keywords:** *biomechanical analysis of movements, impact-friction interaction, elastic-friction interaction, Hermite function*

**Acknowledgments:** the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 124041500009-8).

**For citation:** Musalimov V. M., Perepelkina S. Yu., Erofeev M. A. Modeling of transverse tangential interaction of the foot with the supporting surface. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 10. P. 831–836 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-831-836.

**Введение.** Биомеханика и функции стопы различны в фазах фрикционного взаимодействия с опорной поверхностью. Между фазами ударно-фрикционного взаимодействия переднего и заднего отделов стопы находится в фазе полной опоры, механика которой исследуется в статье. В работе использованы синхронизированные экспериментальные данные системы для захвата движений по исследованию кинематики ходьбы и динамометрической системы [1, 2]. В эксперименте принимали участие женщины и мужчины без явных нарушений здоровья, без каких-либо травм, не являющиеся профессиональными спортсменами. Все фазы взаимодействия представлены на циклограмме рис. 1 (полный цикл шага ( $c$ , %); доли циклов шага при контакте (60 %) и при переносе стопы (40 %)). 1 — пяточный контакт; 2 — полное опирание стопы; 3 — точка в момент перехода на носочную опору; 4 — точка предельного носочного контакта; 5 — точка в момент перехода в фазу переноса стопы; 6, 7 — точки в фазе переноса; 8 — точка пяточного контакта в момент завершения фазы переноса).

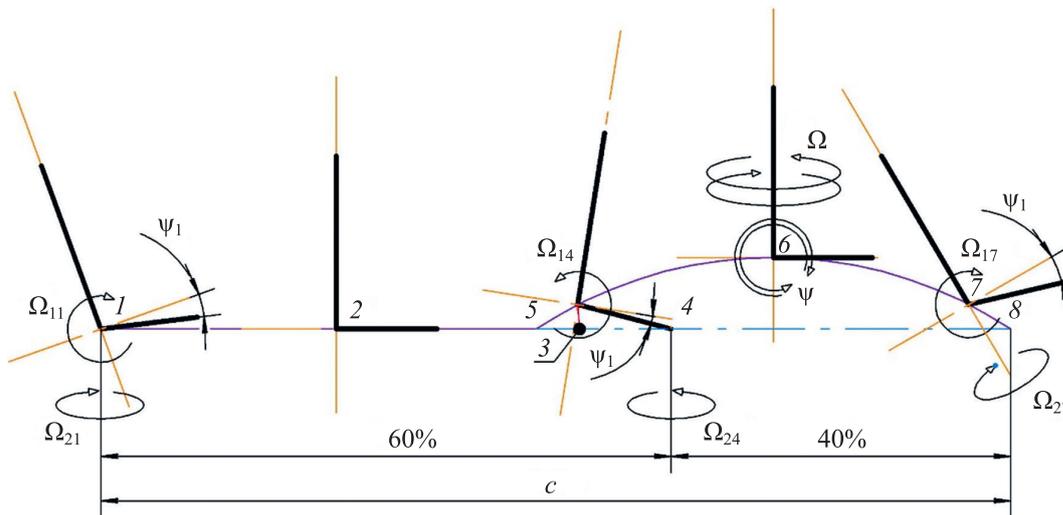


Рис. 1

Система координат представлена в сагиттальной плоскости двумя ортогональными осями, одна из которых жестко связана с осью голени. Отметим, что 60 % цикла шага ( $c = 60$ ) соответствуют только последовательности конфигураций голеностопного сустава в фазе контакта с опорной поверхностью. При пяточном (первая конфигурация) и носочном (вторая конфигурация) контактах наблюдается подошвенное разгибание — угол  $\psi_1$ . Третья конфигурация описывается ортогональной системой координат — полное опирание стопы. В целях удобства образного представления эти конфигурации на рисунке пространственно разнесены. При опоре на пятку возникают вращающий момент в сагиттальной плоскости и сопутствующий вращающий — в опорной. Введем обозначения соответствующих угловых скоростей:  $\Omega_{11}$ ,  $\Omega_{21}$ . Первые индексы соотносятся с номерами плоскостями, вторые — точек. При опоре на носок также возникают вращающие моменты. В опорной плоскости моменту соответствует угловая скорость  $\Omega_{24}$ , а в сагиттальной —  $\Omega_{14}$ . Фаза переноса стопы обозначена условной дугой с точками 5–8. В этой фазе ступня совершает колебательные движения:  $\Omega(t)$  — относительно оси, связанной с голенью, и  $\psi(t)$  — в сагиттальной плоскости. Отрезок прямой с граничными точками 3, 8 определяет длину шага.

Ранее нами были установлены закономерности ударно-фрикционного взаимодействия пятки и носка стопы [3]. При этом фаза полного опирания (переката) не вписывалась в „удар-

ную концепцию“. Целью настоящей работы является моделирование механики переката стопы. Отметим, что в ряде работ только отмечается факт проявления поперечной составляющей силы трения [4–8]. Даже специалисты в области оценок жесткости голеностопных суставов не принимают во внимание этот фактор [9–12], и моделированию этого явления не уделялось должного внимания.

**Анализ экспериментальных данных.** На рис. 2 представлено распределение касательных поперечных сил  $F$  в плоскости опоры.

Пяточная и носочная области стопы постоянно находятся в зонах ударного взаимодействия, которое в опорной плоскости естественно моделируется обобщенными функциями Эрмита [3]. Преимуществом обобщенных функций Эрмита является свойство локальности, заключающееся в том, что их поведение в пространстве на  $[x_1, x_2]$  не зависит от поведения и построения на других отрезках. Этими функциями удобно моделировать ударно-фрикционное взаимодействие, которое проявляется как локальный импульс или момент импульса силы. Кроме того, параметры этих функций благодаря развитому аппарату теории вероятностей прозрачны для интерпретации результатов расчетов. Так, на рис. 3 слева (пятка) и справа (носок) локальные взаимодействия при трении верчения представлены формулами:

—  $c = 0–20\%$

$$E_1 = A_1(x - B_1)\exp(-((x - B_1)/D_1)^2), \quad (1)$$

—  $c = 40–55\%$

$$E_2 = A_2(x - B_2)\exp(-((x - B_2)/D_2)^2) \quad (2)$$

с параметрами данных, полученных из эксперимента.  $B_1 = 10$ ;  $B_2 = 50$ ;  $D_1 = 4$ ;  $D_2 = 4$ ;  $a_1 = -1,25$ ; при этом  $F = E_1 + E_2$ . В (1), (2)  $A$  — предельные значения функций,  $B$  — точки мгновенного касания пятки и носка с опорной поверхностью,  $D$  — дисперсионный параметр, здесь аргумент  $c = x$ .

Как видно из рис. 2 и 3, фаза переката находится в пределах  $c = 16–44\%$ , т. е. вне локальных зон функций Эрмита. На рис. 4 эта фаза представлена наклонным участком, который аппроксимируется линейным уравнением

$$F_g = a + bx, \quad (3)$$

где в условиях представленного распределения сил  $a = 6,168$ ;  $b = 0,1974$ . Здесь  $a \equiv F^*0\%$  — максимальное значение касательных сил в зоне переката стопы;  $b$  — тангенс угла наклона прямой, а  $\gamma = \arctg b = 0,144$  рад — угол наклона прямой, далее принимаемый за угол развертки винтовой линии на модельном цилиндре и угол относительного сдвига того же упругого цилиндра.

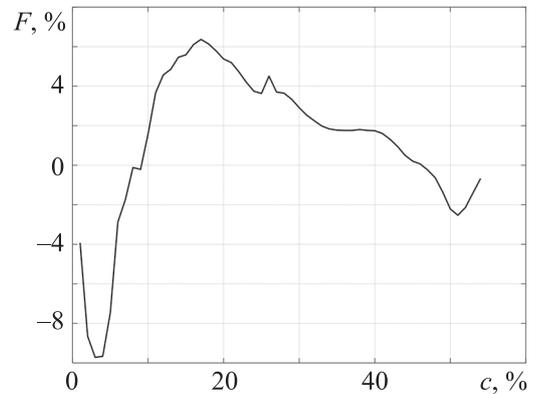


Рис. 2

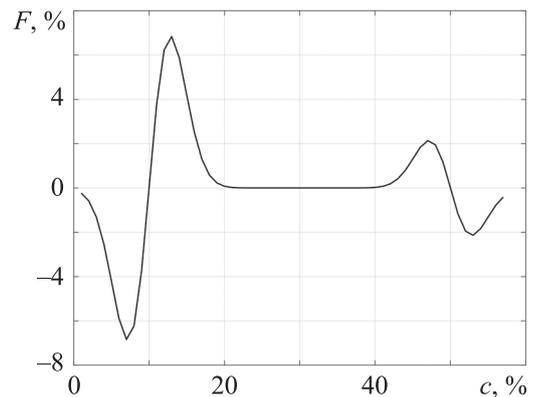


Рис. 3

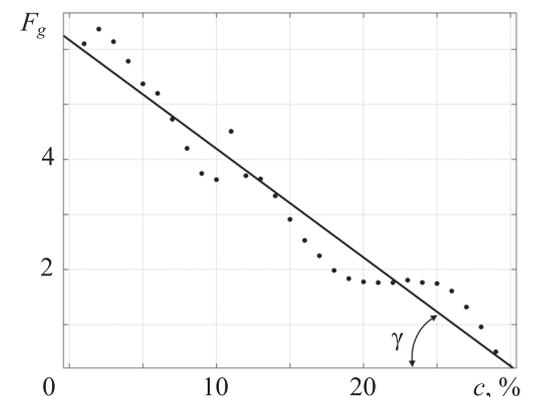


Рис. 4

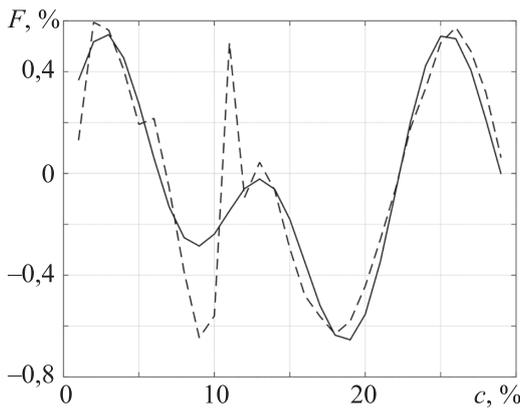


Рис. 5

Кроме того, здесь наблюдается колебательный процесс (точки), который аппроксимируется рядами Фурье (рис. 4, прямая):

$$F = a_0 + a_1 \cos(cw) + b_1 \sin(cw) + a_2 \cos(2cw) + b_2 \sin(2cw), \quad (4)$$

где коэффициенты  $a_0 = -0,096$ ;  $a_1 = 0,1182$ ;  $b_1 = 0,3262$ ;  $a_2 = 0,1006$ ;  $b_2 = 0,3316$ ;  $w = 0,2768$  — частота колебаний (рис. 5, штрихи — эксперимент, сплошная — ряд Фурье).

Таким образом, винтовое движение совместно с поперечным колебательным процессом реализует перекаат стопы. Для образного представления

процесса перекаата стопы можно было бы использовать метафору „ход змеи“.

**Винтовое перекаатывание.** При постановке задачи примем, что боковая часть подошвы представляет собой армированный вдоль оси коллагеновыми волокнами упругий цилиндр. В начале контакта пятки с опорой под тупым углом голень–стопа, как показывает опыт [13], формируется ударный момент пары сил, которые моделируются обобщенными функциями Эрмита  $E_1(c)$ . Одновременно закручивается цилиндр на угол  $\gamma$ , и волокна при этом располагаются по винтовой линии AC (рис. 6). Сам цилиндр за счет пружинного действия арочной ступни укорачивается — отрезок BC. Далее реализуется процесс тыльного сгибания, имеющего критическую точку и критическое значение, по достижении которого начинается процесс перекаатывания цилиндра по винтовой. Это соответствует развертке винтовой линии, где A'C — это первоначальная длина цилиндра. Угол  $\gamma$  является углом относительного сдвига при кручении [14] и далее с учетом модуля сдвига  $G$  рассчитываются касательные напряжения на боковой поверхности цилиндра и опорной поверхности, которые и формируют силы трения в поперечном направлении при ходьбе. На рис. 6 представлена схема упруго-винтового перекаата стопы, где  $q$ , % — распределенная вертикальная нагрузка в этой зоне.

Известно [14], что угол закручивания вычисляется по формуле:

$$\angle AOB = \varphi = \frac{M_{кр} BC}{GJ_p},$$

где  $J_p = \frac{\pi d^4}{32}$  — полярный момент инерции круглого стержня (цилиндра),  $d = 2r$  — плечо пары сил,  $M_{кр} = Fd$  — момент кручения.

После несложных алгебраических преобразований получим выражение для поперечного упруго-фрикционного увода стопы:

$$\frac{F^x}{\text{tg}\gamma} = \frac{\pi r^2}{2} G. \quad (5)$$

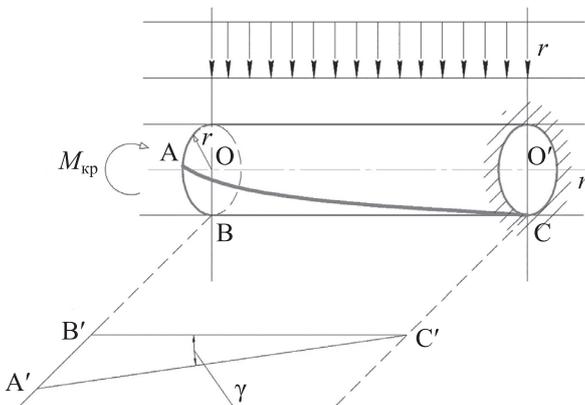


Рис. 6

Формула (5) отражает связь между силами касательного поперечного взаимодействия стопы с учетом упругих свойств ее подошвенной части, с геометрией упругого приведенного стержня и углом развертки винтовой линии — углом увода стопы. По существу это формула упруго-винтового увода стопы. Практическая ценность формулы заключается, например, в обоснованном проектировании реабилитационного ортеза стопы с учетом левого-правого винтов. Отметим, что левая часть

формулы описывает результат обработки данных эксперимента; значения параметров правой части имеют некоторую неопределенность, потому что при использовании подхода „приведенный цилиндр“ радиус цилиндра не может быть выбран произвольным, а только в паре с модулем сдвига  $G$ :

$$Z = r^2 G,$$

где  $Z = \frac{2}{\gamma\pi} F^*$ , и при задании параметра  $Z$  радиус может быть оценен, как это представлено на рис. 7.

Здесь сплошная кривая получена при значении  $Z = 400$  %, пунктир — при  $Z = 500$  %, что соответствует весу 70 и 80 кг испытуемых.

**Заключение.** Опыты показали, что в пяточной и носочной областях ступни силы поперечного касательного взаимодействия обеспечивают процесс трения вращения, сам процесс локализован. В силу этого для моделирования процесса были использованы локализованные функции Эрмита. В области переката стопы, в свою очередь, силы касательного взаимодействия моделируются винтовым упруго-фрикционным уводом и колебательно-скользящим взаимодействием латерального участка ступни с поверхностью. Полученная в результате исследований формула упруго-винтового увода стопы используется для оценки радиуса приведенного упругого стержня (цилиндра), что является основанием для разработки конструктивных рекомендаций при производстве ортезов.

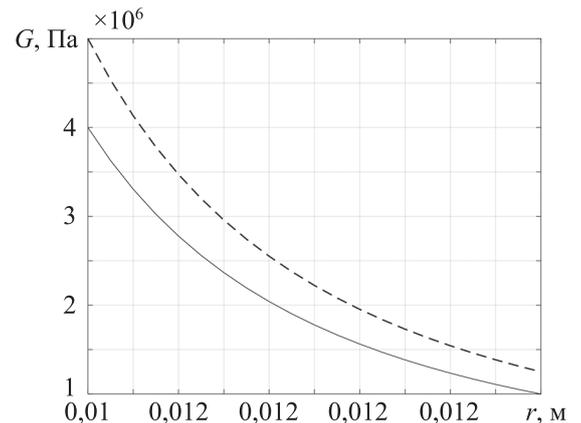


Рис. 7

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мусалимов В. М., Паасуке М., Ганеева Е., Ерелине Я., Ерофеев М. А. Моделирование динамики опорно-двигательной системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17, № 6. С. 1159–1166.
2. Мусалимов В. М., Перепелкина С. Ю. Построение зависимостей между параметрами динамических моделей на основе анализа кинематики ходьбы // Сб. тез. докл. на XIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике. 21–25 августа 2023 г. СПб: Политех-Пресс, 2023. Т. 4. С. 86–87.
3. Мусалимов В. М., Ерофеев М. А., Монахов Ю. С., Малов М. С. Моделирование ударно-фрикционного взаимодействия стопы с опорной поверхностью с использованием базиса обобщенных функций Эрмита // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 8. С. 652–659. DOI:10.17586/0021-3454-2023-66-8-652-659.
4. Перепелкин А. И., Мандриков В. Б., Краюшкин А. И., Атрощенко Е. С. Некоторые особенности механических свойств стопы человека // Вестник ВолгГМУ. 2016. Вып. 3(59). С. 22–24.
5. Оганесян О. В., Иванников С. В., Коршунов А. В. Восстановление формы и функции голеностопного сустава шарнирно-дистракционными аппаратами. М.: БИНОМ, 2003.
6. Витензон А. С. Закономерности нормальной и патологической ходьбы человека. М.: Зеркало, 1998. 271 с.
7. Скворцов Д. В. Диагностика двигательной патологии инструментальными методами: анализ походки, стабилометрия. М., 2007. 617 с.
8. Каган И. И. Топография, анатомия и оперативная хирургия в терминах, понятиях, классификациях. Оренбург: ОрГМА, 1997. 178 с.
9. Nalam V., Adjei E., and Lee H. Quantification and Modeling of Ankle Stiffness during Standing Balance // IEEE Trans. Biomed. Eng. 2021. Vol. 68, N 6. P. 1828–1837. DOI: 10.1109/TBME.2020.3023328.
10. Roy A., Krebs H. I., Patterson S. L., Judkins T. N., Khanna I., Forrester L. W., Macko R. M., Hogan N. Measurement of Human Ankle Stiffness Using the Anklebot // Proceedings of the 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics. Noordwijk, 12–15 June 2007. DOI: 10.1109/ICORR.2007.4428450.
11. Kato E., Kanehisa H., Fukunaga T., Kawakami Y. Changes in ankle joint stiffness due to stretching: The role of tendon elongation of the gastrocnemius muscle // European Journal of Sport Science. 2010. Vol. 10, N 2. P. 111–119. DOI: 10.1080/17461390903307834.
12. Wind A. M., Rouse E. J. Neuromotor Regulation of Ankle Stiffness is Comparable to Regulation of Joint Position and Torque at Moderate Levels // Sci. Rep. 2020. Vol. 10, N 1. P. 10383. DOI: 10.1038/s41598-020-67135-x.

13. Мусалимов В. М., Перепелкина С. Ю., Гапеева Е., Паасуке М., Ерелине Я., Ерофеев М. А. Количественная оценка и моделирование биомеханических характеристик голеностопного сустава // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2024. Т. 24, № 3. С. 446–454. DOI:10.17586/2226-1494-2024-3-445-454.
14. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Виктор Михайлович Мусалимов** — д-р техн. наук, профессор; Институт проблем машиноведения РАН; главн. науч. сотр.; E-mail: musvm@yandex.ru
- Светлана Юрьевна Перепелкина** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Высшая школа автоматизации и робототехники; доцент; E-mail: Svetlana.yu.perpelkina@gmail.com
- Михаил Александрович Ерофеев** — аспирант; Институт проблем машиноведения РАН

Поступила в редакцию 03.06.24; одобрена после рецензирования 11.06.24; принята к публикации 23.08.24.

## REFERENCES

- Musalimov V.M., Paasuke M., Gapeeva E., Erelina Ya., Erofeev M.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, no. 6(17), pp. 1159–1166. (in Russ.)
- Musalimov V.M., Perepelkina S.Yu. *Tezisy докладov na XIII Vserossiyskom s"yezde po teoreticheskoy i prikladnoy mekhanike* (Abstracts of Reports at the XIII All-Russian Congress on Theoretical and Applied Mechanics), St. Petersburg, 2023, vol. 4, pp. 86–87. (in Russ.)
- Musalimov V.M., Erofeev M.A., Monakhov Yu.S., Malov M.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 8(66), pp. 652–659, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-652-659. (in Russ.)
- Perepelkin A.I., Mandrikov V.B., Krayushkin A.I., Atroschenko E.S. *Journal of Volgograd State Medical University*, 2016, no. 3(59), pp. 22–24. (in Russ.)
- Oganesian O.V., Ivannikov S.V., Korshunov A.V. *Vosstanovleniye formy i funktsii golenostopnogo sustava sharniro-distraktsionnymi apparatami* (Restoration of the Shape and Function of the Ankle Joint with Hinge-Distractor Devices), Moscow, 2003, 120 p. (in Russ.)
- Vitenzon A.S. *Zakonomernosti normal'noy i patologicheskoy khod'by cheloveka* (Patterns of Normal and Pathological Human Walking), Moscow, 1998, 271 p. (in Russ.)
- Skvortsov D.V. *Diagnostika dvigatel'noy patologii instrumental'nymi metodami: analiz pokhodki, stabilometriya* (Diagnostics of Movement Pathology with Instrumental Methods: an Analysis of Gait, Stabilometry), Moscow, 2007, 617 p. (in Russ.)
- Kagan I.I. *Topografiya, anatomiya i operativnaya khirurgiya v terminakh, ponyatiyakh, klassifikatsiyakh* (Topography, Anatomy and Operative Surgery in Terms, Concepts, Classifications), Orenburg, 1997, 178 p. (in Russ.)
- Nalam V., Adjei E., and Lee H. *IEEE, Trans. Biomed. Eng.*, 2021, no. 6(68), pp. 1828–1837, DOI: 10.1109/TBME.2020.3023328.
- Roy A., Krebs H.I., Patterson S.L., Judkins T.N., Khanna I., Forrester L.W., Macko R.M., Hogan N. *Proceedings of the 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Noordwijk, June 12–15, 2007, DOI:10.1109/icorr.2007.4428450.
- Kato E., Kanehisa H., Fukunaga T., Kawakami Y. *European Journal of Sport Science*, 2010, no. 2(10), pp. 111–119, DOI: 10.1080/17461390903307834.
- Wind A.M., Rouse E.J. *Sci. Rep.*, 2020, no. 1(10), pp. 10383, DOI: 10.1038/s41598-020-67135-x.
- Musalimov V.M., Perepelkina S.Yu., Paasuke M.A., Gapeeva E.N., Erelina J.J., Erofeev M.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, no. 3(24), pp. 520–527, DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-520-527. (in Russ.)
- Timoshenko S.P., Goodyer J. *Teoriya uprugosti* (Theory of Elasticity), Moscow, 1975, 576 p. (in Russ.)

## DATA ON AUTHORS

- Victor M. Musalimov** — Dr. Sci., Professor; Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS; Chief Researcher; E-mail: musvm@yandex.ru
- Svetlana Yu. Perepelkina** — PhD; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; Higher School of Automation and Robotics; Associate Professor; E-mail: Svetlana.yu.perpelkina@gmail.com
- Michael A. Erofeev** — Post-Graduate Student; Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS

Received 03.06.24; approved after reviewing 11.06.24; accepted for publication 23.08.24.

**МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТУПЕНЧАТОЙ ТРАНСМИССИИ  
В ЭЛЕКТРОМОБИЛЕ****Д. Е. Ишимов<sup>1\*</sup>, Н. Н. Демидов<sup>1</sup>, Е. Б. Седакова<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия\* [daniil\\_ishimov@mail.ru](mailto:daniil_ishimov@mail.ru)<sup>2</sup> Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Рассмотрены основные схемы трансмиссий современных транспортных средств, проанализирована практика их использования крупными концернами в составе электромобилей. Показаны возможности и преимущества применения трансмиссий с изменяемым передаточным отношением, выделены основные проблемы, оказывающие влияние на эффективность электромобиля в целом. По результатам выполненных расчетов разработаны рекомендации, касающиеся выбора основных параметров трансмиссии электромобиля в зависимости от требований и условий эксплуатации. Составленные рекомендации направлены на повышение коэффициента полезного действия и улучшение тяговых характеристик транспортного средства электромобиля. В среде MatLab Simulink выполнена модельная оценка трансмиссии с нефиксированным передаточным отношением в составе транспортного средства с электрической силовой установкой и проведен анализ возможности применения такой трансмиссии. Предложена методика определения оптимальных параметров трансмиссии на основе разработанной модели транспортного средства в среде Simulink.

**Ключевые слова:** электромобиль, эффективность, параметры трансмиссии, тяговые характеристики, коэффициент полезного действия, трансмиссия с изменяемым передаточным числом

**Благодарность:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>.

**Ссылка для цитирования:** Ишимов Д. Е., Демидов Н. Н., Седакова Е. Б. Модельная оценка возможности применения ступенчатой трансмиссии в электромобиле // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 837–843. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-837-843.

**MODEL ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING A STEPPED TRANSMISSION  
IN AN ELECTRIC VEHICLE****D. E. Ishimov<sup>1\*</sup>, N. N. Demidov<sup>1</sup>, E. B. Sedakova<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia\* [daniil\\_ishimov@mail.ru](mailto:daniil_ishimov@mail.ru)<sup>2</sup> Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, St. Petersburg, Russia

**Abstract.** The main transmission schemes of modern vehicles are considered, the practice of their use by large concerns as part of electric vehicles is analyzed. The possibilities and advantages of using transmissions with variable gear ratios are shown, and the main problems affecting the efficiency of an electric vehicle as a whole are highlighted. Based on results of calculations, recommendations are developed regarding the selection of the main parameters of the electric vehicle transmission, depending on the requirements and operating conditions. The recommendations are aimed at increasing the efficiency and improving the traction characteristics of an electric vehicle. In the MATLAB Simulink environment, a model evaluation of a transmission with an unfixed gear ratio as part of a vehicle with an electric power plant was performed and an analysis of the possibility of using such a transmission was carried out. A method for determining the optimal transmission parameters based on the developed vehicle model in the Simulink environment is proposed.

**Keywords:** electric vehicle, efficiency, transmission parameters, traction characteristics, efficiency, variable ratio transmission

**Acknowledgments:** the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>.

**For citation:** Ishimov D. E., Demidov N. N., Sedakova E. B. Model assessment of the possibility of using a stepped transmission in an electric vehicle. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 10. P. 837–843 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-837-843.

**Введение.** В настоящее время задача электрификации транспортных средств особо актуальна в связи с рядом преимуществ электродвигателя, по сравнению с классическим двигателем внутреннего сгорания, к которым относятся высокий и ровный вращающий момент, доступный с малых оборотов, пиковый коэффициент полезного действия (КПД), достигающий 99 %, меньшие габариты силовой установки при сравнимой выдаваемой мощности, экологическая безопасность [1–3]. Таким образом, применение электродвигателя в качестве основного тягового агрегата для транспортных средств может обеспечить труднодостижимые для классических автомобилей потребительские характеристики.

Однако транспортные средства с электродвигателем в качестве основной тяговой установки имеют ряд недостатков, к которым следует отнести сложность и неэффективность современных способов генерации и аккумуляции энергии, узкий диапазон высоких значений КПД [4]. В реальных условиях эксплуатации вышеперечисленные недостатки становятся комплексной проблемой для владельцев электромобилей. Для устранения указанных недостатков представляется эффективным использование многоступенчатых трансмиссий [5].

Цель исследований состоит в обосновании возможности применения в составе электромотоцикла многоступенчатой коробки переключения передач (КПП), позволяющей изменять передаточное отношение, а также в определении основных параметров многоступенчатой трансмиссии для эффективного использования характеристик двигателя.

**Методы исследований.** Для достижения поставленной цели были использованы современные системы инженерного анализа (CAE). На рис. 1 представлен фрагмент схемы трансмиссии автомобиля, разработанной для имитационного моделирования движения в среде Simulink: блок TorqueConverter — гидротрансформатор, блок TransmissionRatio — механическая часть КПП с изменяемым, в зависимости от требуемого режима, числом передач.

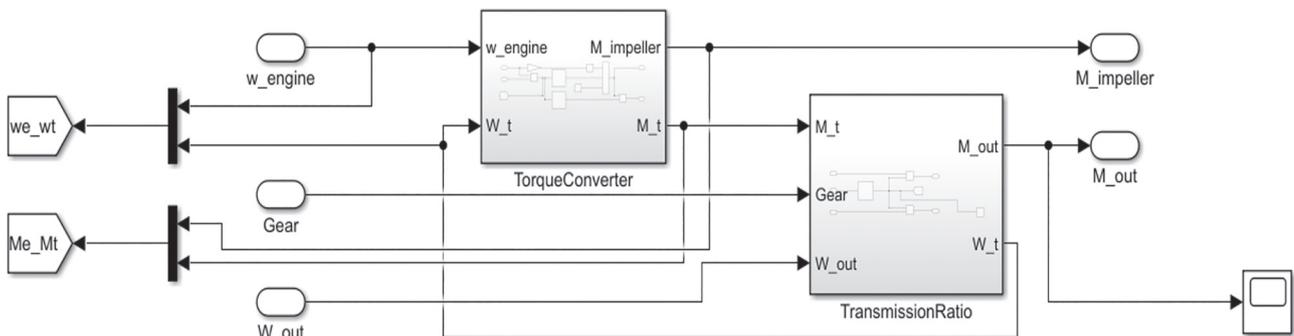


Рис. 1

Входными параметрами для имитационного моделирования по схеме рис. 1 являлись: число оборотов двигателя —  $w\_engine$ , номер передачи —  $Gear$ , количество оборотов выходного вала коробки передач —  $W\_out$ . В качестве выходных параметров регистрировались величины вращающих моментов на насосном колесе гидротрансформатора —  $M\_impeller$  и на выходном валу КПП —  $M\_out$ . Остальные выходные переменные ( $w\_wt$  — обороты турбинного колеса,  $Me\_Mt$  — момент турбинного колеса гидротрансформатора) служили данными для системы управления КПП.

Известно, что электродвигатель постоянного тока характеризуется широким диапазоном рабочих оборотов, это создает возможность применения многоступенчатых трансмиссий [2]. Однако в основном применяемые трансмиссии имеют фиксированное передаточное отношение, что ограничивает тяговые характеристики электромотоцикла. Для обоснования введения в

трансмиссию функции изменения передаточного отношения в среде MatLab [6] проведены сравнительные тяговые расчеты для нескольких классов транспортных средств: А — миниавтомобили, Е — автомобили бизнес-класса и J — кроссоверы и внедорожники. Транспортные средства были подобраны так, чтобы полезная мощность их силовой установки была схожей. При выборе электродвигателя в качестве базовых были взяты характеристики автомобиля Е-класса BMW E34 525, полезная мощность которого, по результатам тягового расчета, составила 160 кВт [5, 6]. Таким образом, был подобран общий для всех автомобилей-прототипов электродвигатель с характеристиками, приведенными на рис. 2. По результатам моделирования трансмиссии составлена карта значений КПД выбранного применяемого в современных электромобилях двигателя мощностью 160 кВт, фрагмент которой приведен на рис. 2 (пиковое значение КПД для данного двигателя выделено белой рамкой).

Torque (Nm) Speed (rpm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
500	64.66	71.35	72.93	73.39	73.36	73.63	73.78	72.93	72.5	72.25	71.77	71.65	71.52	70.52	70.24
1000	74.3	80.49	81.75	82.56	82.55	82.55	82.81	82.47	82.13	82.01	81.71	81.56	81.34	80.69	80.68
1500	77.19	83.4	85.09	86.06	86.35	86.59	86.38	86.4	86.16	85.78	85.46	85.6	85.53	85.33	84.83
2000	78.03	84.79	86.86	87.84	88.07	88.36	88.3	88.33	88.3	88.14	88.13	87.98	87.7	87.73	87.49
2500	78.95	85.63	87.82	88.79	89.2	89.36	89.51	89.56	89.53	89.36	89.36	89.29	89.22	89.04	88.89
3000	79.15	86.09	88.49	89.39	89.94	90.22	90.32	90.48	90.33	90.42	90.17	90.25	90.24	90.05	89.84
3500	79.57	86.57	88.9	89.81	90.39	90.67	90.93	91.06	91	91.02	90.96	90.99	90.79	90.81	90.62
4000	79.36	86.79	89.15	90.24	90.8	91.25	91.38	91.45	91.47	91.43	91.46	91.53	91.33	91.4	91.2
4500	79.04	86.76	89.22	90.56	91.13	91.46	91.77	91.89	91.95	92	92	91.99	91.87	91.81	91.74
5000	78.67	86.92	89.53	90.65	91.42	91.79	92.21	92.13	92.18	92.36	92.29	92.31	92.22	92.44	92.18
5500	79.51	87.08	89.83	90.91	91.74	92.13	92.15	92.36	92.75	92.6	92.96	92.71	92.65	92.51	92.71
6000	79.45	87.26	90.03	91.04	91.83	92.29	92.53	92.52	92.93	93.09	93.26	93.35	93.05	92.99	92.88
6500	79.18	87.16	89.98	91.18	92	92.42	92.83	93.11	93.32	93.38	93.4	93.31	93.3	93.08	92.88
7000	78.8	87.22	90.05	91.39	92.35	92.62	93	93.19	93.48	93.54	93.53	93.4	93.28	93.24	92.7
7500	77.92	87.01	89.78	91.66	92.2	92.7	93.09	93.63	93.57	93.26	93.01	92.48	92.9	92.57	92.68
8000	77.79	87.04	90.37	91.36	92.73	92.8	93.03	93.48	93.22	93.55	93.18	93.26	92.99	92.87	92.52
8500	77.73	87.05	90.13	91.74	92.48	92.9	93.16	93.42	93.17	93.43	93.09	93.18	92.91	92.82	92.3
9000	77.52	88.02	90.23	91.82	93.14	93	93.17	93.9	92.98	92.87	92.72	93.2	92.22	92.39	91.89
9500	78.12	86.96	90.23	91.93	92.67	92.63	92.67	93.21	93.06	92.53	92.55	92.68	92.48	91.76	91.54
10000	71.71	83.98	88.76	90.06	91.3	91.98	92.51	92.46	92.61	92.73	92.45	92.52	92.11	91.99	
10500	74.09	84.91	88.68	90.54	91.54	92.12	92.4	92.52	92.59	92.51	92.35	92.15	91.87		
11000	75.09	85.18	88.74	90.84	91.5	92.06	92.31	92.4	92.4	92.27	92.17	91.81			
11500	75.2	84.93	88.74	90.48	91.34	91.83	92.17	92.23	92.22	92.07	91.75	91.6			
12000	75.21	84.98	88.55	90.34	91.24	91.74	91.89	92.07	91.97	91.8	91.49				
12500	74.31	85.83	88.87	90.16	91.03	91.78	91.77	91.23	91.21	91.31	91.55				
13000	74.17	84.25	88.15	89.89	90.89	91.33	91.52	91.58	91.37	91.08					
13500	72.9	83.4	87.16	89.01	89.55	90.36	90.41	90.52	90.52	90.18					
14000	72.26	82.95	86.91	88.86	89.79	89.99	90.37	90.29	90.06						
14500	71.94	82.77	86.73	88.43	89.67	90.01	90.26	89.85	89.86						
15000	72.04	82.86	86.75	88.38	89.33	89.66	89.98	89.69							

Рис. 2

В верхней строке карты указаны значения момента на валу электродвигателя с шагом 10 Н·м, при этом максимальный развиваемый момент составляет 300 Н·м. В крайнем левом столбце карты приведены значения частоты вращения якоря электродвигателя с шагом 500 об/мин до максимального значения — 15 000 об/мин. КПД определялся по известной формуле [7]:

$$\eta = \frac{P_3}{P} 100\%, \tag{1}$$

где  $P_3$  — вырабатываемая на валу электродвигателя мощность;  $P$  — мощность, потребляемая электродвигателем из сети.

Заметим, что  $P_3$  зависит от величины электромагнитного момента на валу двигателя, который определяется по формуле [7]:

$$M = C\Phi I_{\text{я}} = \frac{9,55P_3}{n}, \tag{2}$$

где  $\Phi$  — магнитный поток;  $C$  — постоянный коэффициент, определяемый конструкцией двигателя;  $I_{\text{я}}$  — ток якоря;  $n$  — частота вращения якоря электродвигателя.

Из (2) несложно выразить  $P_3$  и далее использовать полученное значение в (1) для расчета КПД электродвигателя. Нижняя отсечка значений КПД по столбцам обусловлена максимальной мощностью электродвигателя.

**Результаты и их обсуждение.** Анализ типов и схем трансмиссий электромобилей позволил сформулировать некоторые рекомендации по выбору оптимальной схемы для рассматриваемых классов автомобилей [8, 9].

На рис. 3, а приведены зависимости КПД электродвигателя от скорости движения автомобиля Е-класса с трансмиссией, имеющей пять передач (1 — для первой передачи; 2 — второй; 3 — третьей; 4 — четвертой; 5 — пятой), на рис. 3, б — зависимость КПД от скорости движения автомобиля с трансмиссией с фиксированным передаточным отношением (без КПП).

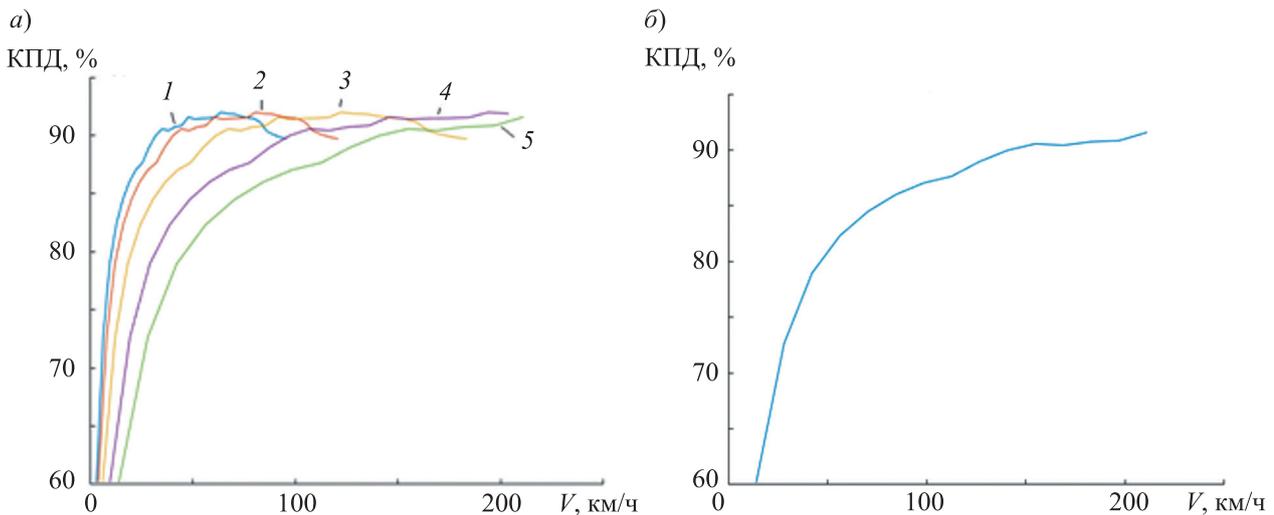


Рис. 3

Из рис. 3 следует, что введение в трансмиссию электромобиля КПП позволяет увеличить КПД двигателя в рабочем диапазоне скоростей движения от 25 до 200 км/ч. В широко используемом диапазоне скоростей 25–100 км/ч КПД возрастает на 12–13 %, достигая 90–93 % (рис. 2), по сравнению с аналогичными показателями, не превышающими 85 %, при использовании фиксированного передаточного отношения [3, 10–13]. Поэтому даже при условии снижения КПД двигателя в случае введения нескольких ступеней КПП суммарный КПД электромобиля вырастает в широком диапазоне скоростей [6].

Прирост КПД зависит от характеристик двигателя, условий движения, разбивки по передачам, типа КПП, но, как следует из проведенных расчетов, суммарно увеличивается на 5–12 % [10–13]. При дальнейшей оптимизации передаточных отношений в среде Simulink этот прирост можно еще увеличить [4–6]. Из рис. 3, а видно, что можно сократить число передач до трех. На рис. 3, а кривая 1 практически полностью совпадает с кривой 2, это означает, что необходимо скорректировать передаточное отношение первой передачи таким образом, чтобы можно было исключить вторую передачу. Затем следует скорректировать передаточные отношения третьей и четвертой передач (кривые 3 и 4 на рис. 3, а) таким образом, чтобы исключить пятую передачу (кривая 5), обеспечив пересечение (переключение передачи) на максимально высоком КПД, при условии достижения максимальной скорости на четвертой передаче (кривая 4). Сокращение числа передач с пяти до трех позволит повысить компактность трансмиссии. Стоит отметить, что пример, приведенный на рис. 3, отображает эффективность транспортного средства в одном из режимов движения. Для более полной оптимизации трансмиссии необходимо дополнить расчетную модель характерными параметрами условий эксплуатации транспортных средств, такими как неравномерность движения, уклоны дороги, наличие препятствий [6, 14, 15].

Повысить эффективность преобразования энергии в работу движения электромобиля за счет улучшения разгонной динамики можно благодаря использованию коробки передач. На

рис. 4 представлены зависимости ускорения  $a$  электромобиля с КПП ( $a$ ; 1 — для первой передачи; 2 — второй; 3 — третьей; 4 — четвертой; 5 — пятой) и без нее ( $b$ ) от скорости движения. Из зависимостей, приведенных на рис. 4, следует, что кривая ускорения электромобиля с фиксированным числом передач почти полностью совпадает с кривой ускорения на пятой передаче (рис. 4,  $a$ , кривая 5). Таким образом, введение КПП позволяет значительно улучшить динамические характеристики электромобиля (рис. 4,  $a$ ). Представленные зависимости построены с учетом максимального коэффициента трения колес об асфальтовое покрытие дороги [6].

Проанализировав полученные данные, можно заключить, что для одного и того же электромобиля возможно использовать как менее мощный двигатель, но с КПП и с сохранением динамических характеристик, так и более мощный, но с фиксированным передаточным отношением трансмиссии.

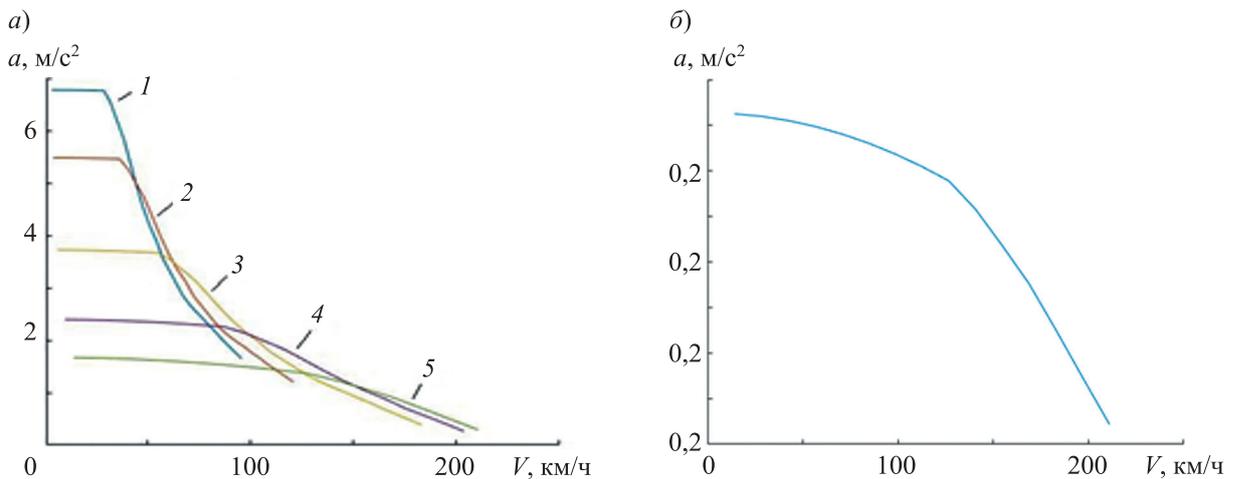


Рис. 4

Необходимо отметить, что массогабаритные характеристики электродвигателя зависят от его мощности. Применение электродвигателя меньшей мощности позволяет снизить стоимость автомобиля. Также к эффективности автомобиля следует отнести возможность обеспечения требуемого ресурса трансмиссии, на который существенно влияет марка применяемого масла. Однако ограничения в поставках импортных масел и работы по совершенствованию отечественных конструкций КПП с вариаторами обеспечивают актуальность триботехнических исследований в части разработки конструкций трибосопряжений и уплотнений [16, 17], применения антифрикционных покрытий рабочих поверхностей, а также разработки рецептур смазочных масел [18–22].

**Заключение.** Разработка в среде MatLab Simulink расчетной программы, позволяющей подбирать оптимальные характеристики трансмиссии для электромобиля по заданному техническому заданию, является первым этапом в оптимизации трансмиссии. Полученные зависимости показывают, что для большей эффективности электродвигателя в электромобиле необходимо использование трансмиссии с возможностью изменения передаточного отношения.

По результатам сравнительных расчетов тяговых характеристик разных типов электромобилей с КПП с фиксированным передаточным отношением разработаны рекомендации по применению многоступенчатой трансмиссии в составе электромобиля. Так, для автомобилей А-класса целесообразно использовать централизованную схему с понижающей передачей, имеющей фиксированное передаточное отношение. Для легковых автомобилей Е-класса можно рекомендовать централизованную схему с коробкой, имеющей не менее двух передач. Для внедорожных автомобилей, специальной техники и грузовых автомобилей предпочтительно использование распределенной схемы с КПП. Кроме того, представляется эффективным переход от электромобилей, использующих энергию, получаемую путем химических реакций, без применения горения (Full Cell), к автомобилям с гибридными решениями, так как в сложных условиях эксплуатации требуется большая автономность транспортных средств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баулина Е. Е., Круташов А. В., Серебряков В. В. Нужна ли коробка передач автомобилю с электроприводом? // *Машиностроение и компьютерные технологии*. 2014. № 6. С. 93–106.
2. Sorniotti A. et al. Optimization of a multi-speed electric axle as a function of the electric motor properties // 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2010. P. 1–6.
3. Vehviläinen M. et al. Simulation-Based Comparative Assessment of a Multi-Speed Transmission for an E-Retrofitted Heavy-Duty Truck // *Energies*. 2022. Vol. 15, N 7. P. 2407.
4. Ahssan M. R., Ektesabi M. M., Gorji S. A. Electric vehicle with multi-speed transmission: a review on performances and complexities // *SAE International Journal of Alternative Powertrains*. 2018. Vol. 7, N 2. P. 169–182.
5. Тарасик В. П., Пузанова О. В. Методика определения основных параметров и характеристик электромобиля // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2020. № 4(69). С. 50–60.
6. Поршнев Г. П., Поршнева Е. Г., Худорожков С. И. Проектирование автомобилей и тракторов. Конструирование и расчет трансмиссий автомобилей: учеб. пособие. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2015. 106 с.
7. *Электротехника* / Под ред. В. С. Пантюшина. М.: Государственное энергетическое издательство, 1960. 632 с.
8. Walker P. D. et al. Comparison of powertrain system configurations for electric passenger vehicles // *SAE Technical Papers*. 2015. March 2015. DOI:10.4271/2015-01-0052.
9. Ruan J., Walker P., Zhang N. Comparison of power consumption efficiency of CVT and multi-speed transmissions for electric vehicle // *Intern. Journ. of Automotive Engineering*. 2018. Vol. 9, N 4. P. 268–275.
10. Machado F. A. et al. Multi-Speed Gearboxes for Battery Electric Vehicles: Current Status and Future Trends // *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*. 2021. Vol. 2. P. 419–435.
11. Ruan J. et al. Development of continuously variable transmission and multi-speed dual-clutch transmission for pure electric vehicle // *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 10, N 2. P. 1687814018758223.
12. Kwon K., Jo J., Min S. Multi-objective gear ratio and shifting pattern optimization of multi-speed transmissions for electric vehicles considering variable transmission efficiency // *Energy*. 2021. Vol. 236. P. 121419.
13. Hillesheim T. Energy-efficient Shifting of Electric Multi-speed Transmissions // *ATZ worldwide*. 2021. Vol. 123, N 5. P. 64–67.
14. Козлова Т. А. Методика поиска рациональных конструктивных параметров тягового привода электромобиля // *Вестник евразийской науки*. 2016. Т. 8, № 5(36). С. 74.
15. Дунаев М. П. Математическое и физическое моделирование электромобиля // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2017. № 2(6). С. 65–71.
16. Бреки А. Д., Чулкин С. Г., Гвоздев А. Е., Колмаков А. Г. Обобщенная математическая модель внешнего трения скольжения твердых тел // *Материаловедение*. 2021. № 10. С. 44–48.
17. Кузьмин А. М., Чулкин С. Г., Бреки А. Д. Приспособление для исследования антифрикционных свойств уплотнений из терморасширенного графита // *Актуальные проблемы морской энергетики: Матер. 11-й Междунар. науч.-техн. конф. СПб, 17–18 февраля 2022 г.* С. 377–381.
18. Дроздов Ю. Н., Маленко И. П., Маленко П. И. Исследование резонансных процессов в поверхностных слоях пар трения скольжения со смазочным материалом, вызванных термическими ударами // *Вестник машиностроения*. 2015. № 2. С. 44–52.
19. Кузьмин А. М., Чулкин С. Г., Бреки А. Д. Влияние гидросиликата магния на свойства смазочного масла M8V для пар трения скольжения сталь 35–сталь P6AM5 // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2021. № S1. С. 295–297.
20. Лаихи В. Л., Масько С. В., Самусенко В. Д., Щербаков Ю. И., Буяновский И. А. Взаимодействие между присадками различного функционального назначения и их влияние на адсорбционные свойства моторных масел // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2023. № 12. С. 543–547.
21. Гаркунов Д. Н., Бабель В. Г., Мельников Э. Л., Щедрин А. В., Миняева Л. Х., Бабель А. Л. Металлосодержащие противоизносные противозадирные присадки к моторным маслам двигателей внутреннего сгорания // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2020. № 4. С. 17–24.
22. Пат. РФ 2570643 С1. Противоизносная присадка / А. П. Перекрестов, Ю. Н. Дроздов, В. А. Чанчиков, И. Н. Гужвенко, С. А. Свекольников. 10.12.2015.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Даниил Евгеньевич Ишимов**

— аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Международный научно-образовательный центр „BflTribology“; E-mail: daniil\_ishimov@mail.ru

**Николай Николаевич Демидов**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа транспорта; доцент; E-mail: demidov\_nn@spbstu.ru

**Елена Борисовна Седакова**

— д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Международный научно-образовательный центр „BflTribo-Polytechnic“; профессор; Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Лаборатория трения и износа; зав. лабораторией; E-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.06.24; одобрена после рецензирования 14.06.24; принята к публикации 23.08.24.

#### REFERENCES

1. Baulina E.E., Krutashov A.V., Serebryakov V.V. *Mashinostroyeniye i komp'yuternyye tekhnologii*, 2014, no. 6, pp. 93–106. (in Russ.)
2. Sornioti A. et al. *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010, pp. 1–6.
3. Vehviläinen M. et al. *Energies*, 2022, no. 7(15), pp. 2407.
4. Ahssan M. R., Ektesabi M. M., Gorji S. A. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 2018, no. 2(7), pp. 169–182.
5. Tarasik V. P., Puzanova O. V. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2020, no. 4(69), pp. 50–60. (in Russ.)
6. Porshnev G.P., Porshneva E.G., Khudorozhkov S.I. *Proyektirovaniye avtomobiley i traktorov. Konstruirovaniye i raschet transmissiy avtomobiley* (Design of Automobiles and Tractors. Design and Calculation of Automobile Transmissions), St. Petersburg, 2015, 106 p. (in Russ.)
7. Pantyushin V.S., ed., *Elektrotekhnika* (Electrical Engineering), Moscow, 1960, 632 p. (in Russ.)
8. Walker P. D. et al. *SAE Technical Papers*, March 2015, DOI:10.4271/2015-01-0052.
9. Ruan J., Walker P., Zhang N. *International Journal of Automotive Engineering*, 2018, no. 4(9), pp. 268–275.
10. Machado F. A. et al. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2021, vol. 2, pp. 419–435.
11. Ruan J. et al. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, no. 2(10), pp. 1687814018758223.
12. Kwon K., Jo J., Min S. *Energy*, 2021, vol. 236, pp. 121419.
13. Hillesheim T. *ATZ worldwide*, 2021, no. 5(123), pp. 64–67.
14. Kozlova T.A. *Bulletin of Eurasian Science*, 2016, no. 5(8), pp. 74. (in Russ.)
15. Dunaev M.P. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*, 2017, no. 2(6), pp. 65–71. (in Russ.)
16. Breki A.D., Chulkin S.G., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. *Material Science*, 2021, no. 10, pp. 44–48. (in Russ.)
17. Kuzmin A.M., Chulkin S.G., Breki A.D. *Aktual'nyye problemy morskoy energetiki* (Actual Problems of Marine Energy), Proc. of the 11th International Scientific and Technical Conference, St-Petersburg, February 17–18, 2022, pp. 377–381. (in Russ.)
18. Drozdov Yu.N., Malenko I.P., Malenko P.I. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2015, no. 2, pp. 44–52. (in Russ.)
19. Kuzmin A.M., Chulkin S.G., Breki A.D. *Proceedings of the Krylov State Research Center*, 2021, no. S1, pp. 295–297. (in Russ.)
20. Lashkhi V.L., Mas'ko S.V., Samusenko V.D., Shcherbakov Yu.I., Buyanovskiy I.A. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2023, no. 12, pp. 543–547. (in Russ.)
21. Garkunov D. N. Babel' V.G., Mel'nikov E.L., Shchedrin A.V., Minyazeva L.Kh., Babel' A.L. *Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya*, 2020, no. 4, pp. 17–24. (in Russ.)
22. Patent RU 2570643 C1, *Protivoiznosnaya prisadka* (Anti-Wear Additive), A.P. Perekrestov, Yu.N. Drozdov, V.A. Chanchikov, I.N. Guzhvenko, S.A. Svekol'nikov, Priority 10.12.2015. (in Russ.)

#### DATA ON AUTHORS

**Daniil E. Ishimov**

— Post-Graduate Student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; International Scientific and Educational Center “BaltTribo-Polytechnic”; E-mail: daniil\_ishimov@mail.ru

**Nikolai N. Demidov**

— PhD; Associate Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; Higher School of Transport; E-mail: demidov\_nn@spbstu.ru

**Elena B. Sedakova**

— Dr. Sci., Associate Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, International Scientific and Educational Center “BaltTribo-Polytechnic”; Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, Laboratory of Friction and Wear; Head of the Laboratory; E-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

Received 03.06.24; approved after reviewing 14.06.24; accepted for publication 23.08.24.

### АЛГОРИТМ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ РОЛЕЙ В БЕСПРОВОДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КЛАСТЕРАХ

Д. С. Неструев\*, Д. Б. Борзов

*Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия*

\* *nestruev98@mail.ru*

**Аннотация.** Описана алгоритмическая структура беспроводного вычислительного кластера, основанная на динамическом распределении ролей между его элементами. В результате проведенного анализа выявлено, что динамическое перераспределение ролей в беспроводном вычислительном кластере во время выполнения задач повышает отказоустойчивость. Предложен алгоритм, который может стать основой для разработки беспроводных кластерных моделей с повышенной отказоустойчивостью. Эффективность алгоритма показана на примере сравнительного анализа. Для непосредственного использования алгоритм необходимо доработать и настроить в соответствии с техническими требованиями.

**Ключевые слова:** *беспроводной вычислительный кластер, алгоритм динамического распределения ролей, повышение отказоустойчивости, орбитальная модель, эффективность алгоритма*

**Ссылка для цитирования:** *Неструев Д. С., Борзов Д. Б. Алгоритм перераспределения ролей в беспроводных вычислительных кластерах // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 844–852. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-844-852.*

### ALGORITHM FOR REDISTRIBUTING ROLES IN WIRELESS COMPUTING CLUSTERS

D. S. Nestruev\*, D. B. Borzov

*Southwest State University, Kursk, Russia*

\* *nestruev98@mail.ru*

**Abstract.** The algorithmic structure of a wireless computing cluster based on the dynamic distribution of roles between its elements is described. As a result of performed analysis, it is revealed that the dynamic redistribution of roles in a wireless computing cluster during task execution increases fault tolerance. An algorithm is proposed that can become the basis for the development of wireless cluster models with increased fault tolerance. The algorithm effectiveness is demonstrated by an example of comparative analysis. For direct use, the algorithm must be modified and configured in accordance with technical requirements.

**Keywords:** *wireless computing cluster, dynamic role allocation algorithm, increased fault tolerance, orbital model, algorithm efficiency*

**For citation:** *Nestruev D. S., Borzov D. B. Algorithm for redistributing roles in wireless computing clusters. Journal of Instrument Engineering. 2024. Vol. 67, N 10. P. 844–852 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-844-852.*

**Введение.** Для быстроразвивающейся области распределенных вычислений беспроводные вычислительные кластеры (БВК) стали жизненно важным компонентом, особенно в сценариях, где использование проводных соединений нецелесообразно или невозможно. Эти кластеры состоят из множества беспроводных устройств, взаимодействующих при решении вычислитель-

ных задач. Эффективное перераспределение ролей между этими устройствами имеет решающее значение для оптимизации производительности, повышения отказоустойчивости и управления использованием ресурсов [1]. В настоящей работе рассматривается алгоритм, разработанный для перераспределения ролей в беспроводных вычислительных кластерах, и выполняется сравнительный анализ их эффективности.

Перераспределение ролей в беспроводных вычислительных кластерах предполагает динамическое назначение задач различным узлам (устройствам) на основе различных критериев, таких как вычислительная мощность, время автономной работы, подключение к сети и текущая рабочая нагрузка. Эффективные алгоритмы перераспределения обеспечивают оптимальную работу кластера, адаптируясь к изменениям в среде или рабочей нагрузке без „ручного вмешательства“.

В широком смысле алгоритмы динамического перераспределения ролей принято разделять на [2]: централизованные; децентрализованные; гибридные.

В централизованных алгоритмах при перераспределении ролей полагаются на один управляющий узел, отслеживающий состояние кластера. Этот узел может самостоятельно, по мере необходимости, принимать решения о перераспределении ролей [3, 4]. Преимущества таких алгоритмов заключаются в:

- упрощении процесса принятия решения;
- простоте процесса внедрения и управления.

Отрицательные особенности:

- существование единой точки отказа;
- проблема с масштабируемостью по мере увеличения размера кластера.

В децентрализованных алгоритмах, напротив, процесс принятия решения распределяется между всеми элементами кластера. Каждый узел, в свою очередь, принимает свои собственные решения о перераспределении ролей на основе локальной информации [4]. Преимущества таких алгоритмов состоят в:

- масштабируемости;
- отсутствии отдельной точки отказа.

Также им свойственны такие недостатки, как:

- сложность принятия решений и координации;
- возможность возникновения несогласованных состояний в кластере.

Для эффективной балансировки нагрузки на элементы БВК и повышения его гибкости при адаптации к различным сценариям применяют гибридные алгоритмы, объединяющие положительные стороны централизованного и децентрализованного алгоритмов: например, наличие центрального координатора для глобальных решений и децентрализованных механизмов для локальных корректировок.

В ходе настоящей работы рассмотрены способы перераспределения и резервирования ролей в БВК, проанализированы алгоритмы перераспределения ролей в беспроводных вычислительных кластерах, которые направлены на обеспечение эффективности вычислений, масштабируемости, устойчивости к отказам и энергоэффективности. В результате исследования реализовано решение, которое совмещает в себе простоту процесса внедрения и управления, унаследованную от централизованных алгоритмов, масштабируемость и отсутствие единой точки отказа — от децентрализованных, эффективную балансировку нагрузки на элементы — от гибридных. Разработанное решение применимо в широком спектре отраслей, таких как оборонная промышленность, с целью обеспечения безопасной и гибкой связи между подразделениями, мониторинга окружающей среды, сбора данных из удаленных и труднодоступных районов. Применение решения в сфере здравоохранения позволит анализировать медицинские данные в режиме реального времени, что повысит качество обслуживания пациентов.

**Материалы и методы.** Основанный на ролях подход к построению сетей с возможностью динамической реконфигурации является передовой концепцией в области сетевых технологий, особенно актуальной для разработки беспроводных вычислительных кластеров и систем

интернета вещей (IoT). Такой подход позволяет адаптировать сеть к изменяющимся условиям окружающей среды и эксплуатационным требованиям, тем самым повышая ее надежность, эффективность и масштабируемость [5].

Основные принципы ролевого подхода:

1) динамическое распределение ролей — каждый узел может динамически изменять свою роль (хост, резервный хост, накопитель, резервный накопитель или датчик — рабочая машина, или „пчела“) в зависимости от текущих потребностей сети, ее состояния и состояния окружающей среды. Наглядный пример разделения на роли представлен на рис. 1;

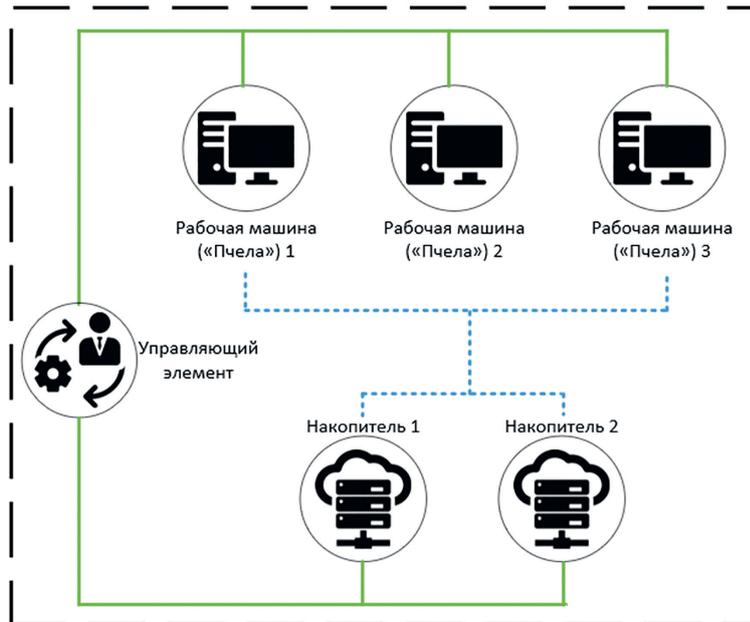


Рис. 1

2) адаптивность и масштабируемость — система способна автоматически адаптироваться к таким изменениям, как добавление или удаление узлов, изменение условий связи или требований к приложениям. Это обеспечивает гибкость при масштабировании системы [6]. Решение о переназначении ролей может быть представлено функцией

$$f(S) \rightarrow R^N,$$

где  $R^N$  — набор ролей для всех узлов в сети;

3) устойчивость к отказам — ролевой подход способствует повышению устойчивости сети к отказам отдельных узлов. Функции узла, в случае его выхода из строя, могут быть переназначены другим узлам. Оценивать вероятность сохранения работоспособности системы после возникновения некоторого числа отказов рекомендуется с учетом зависимости отказов от выполнения узлами различных функций (ролей). При этом могут быть использованы подходы, предложенные в работах [7, 8].

В настоящей статье представлены разработанные авторами алгоритмы функционирования основных элементов беспроводного вычислительного кластера.

По включению питания каждый процессор каждого из  $N$  элементов кластера выполняет:

- 1) общую программу загрузки из внутренней флеш-памяти со стартового адреса;
- 2) определение первичной роли элемента в кластере;
- 3) загрузку из флеш-памяти в ОЗУ программы, соответствующей роли элемента  $M$  кластера;
- 4) считывание контрольной суммы из конечного блока программы и сравнение с рассчитанной для контроля целостности информации;

- 5) рестарт ролевой программы из ОЗУ на выполнение;
- 6) анализ возможного изменения роли элемента путем считывания переменной *TempNum*;
- 7) в случае изменения роли элемента БВК — перезагрузка на исполнение соответствующей ролевой программы.

Стартовый алгоритм функционирования элементов кластера представлен на рис. 2.

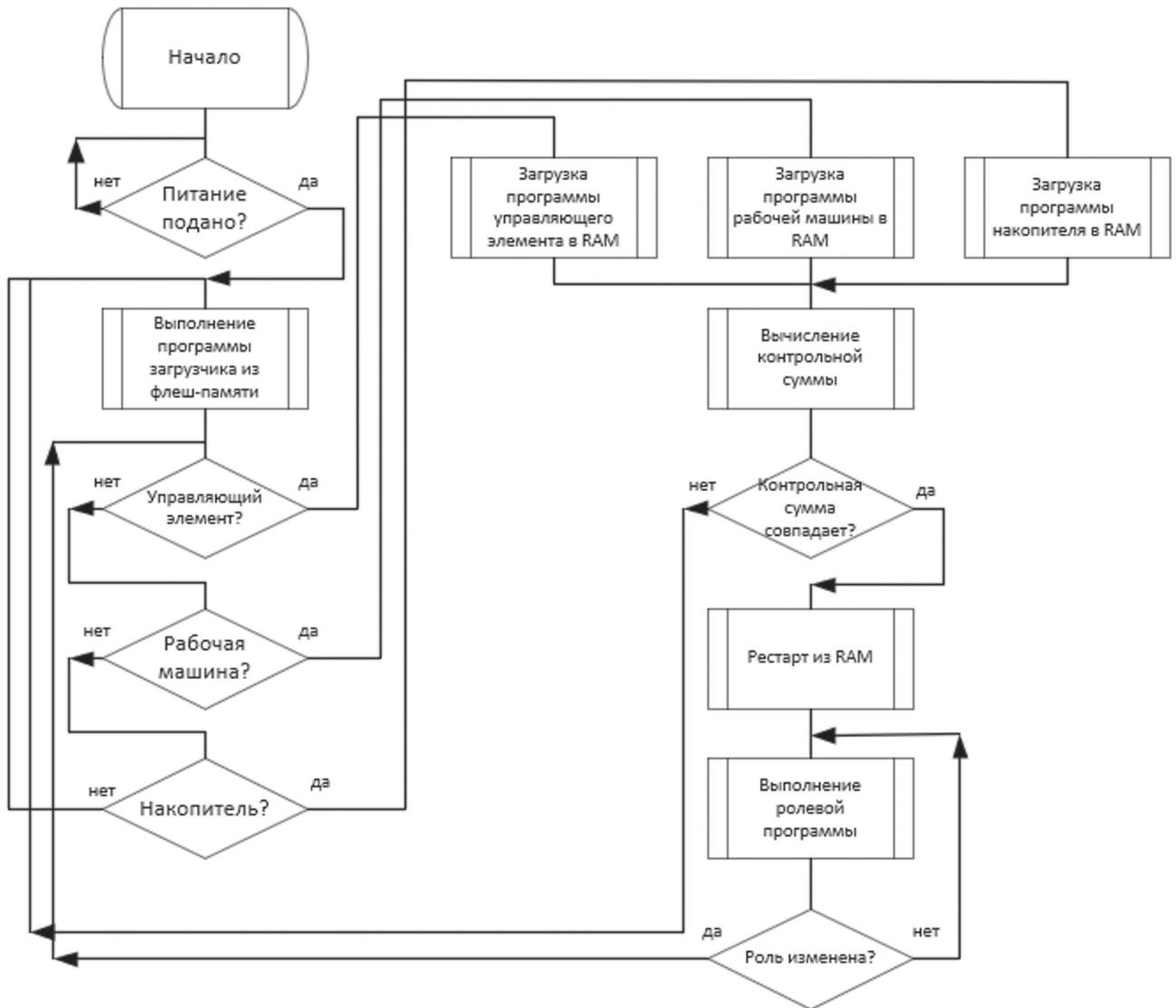


Рис. 2

Следовательно, при подаче электропитания каждый элемент системы выполняет определенные универсальные процедуры, ведущие к инициализации разнообразных функциональных программ [9–11].

Алгоритм функционирования управляющего элемента содержит такие этапы, как:

- 1) загрузка рабочей программы сервера;
- 2) определение собственных координат и опрос подмножества адресов системы для определения количества узлов, готовых к работе;
- 3) опрос готовых к работе узлов для определения технических характеристик и местоположения;
- 4) согласно полученной информации хост формирует начальный граф  $C(M, K)$  с  $N$  вершинами,  $M = \{1, \dots, N\}$ ,  $K$  — расстояние между вершинами;
- 5) по результатам анализа информации происходит распределение ролей в БВК.

На этапе выполнения ролевой программы циклически реализуется ряд функций, которые заложены в программе управляющего элемента. Алгоритм управляющего элемента представлен на рис. 3. „Самоконтроль“ предполагает прохождение элементом внутренних тестов исправности. „Арбитраж“ подразумевает сравнение собственных характеристик с характеристиками резервного элемента, что позволяет определить возможность делегирования управляющих функций [12, 13].

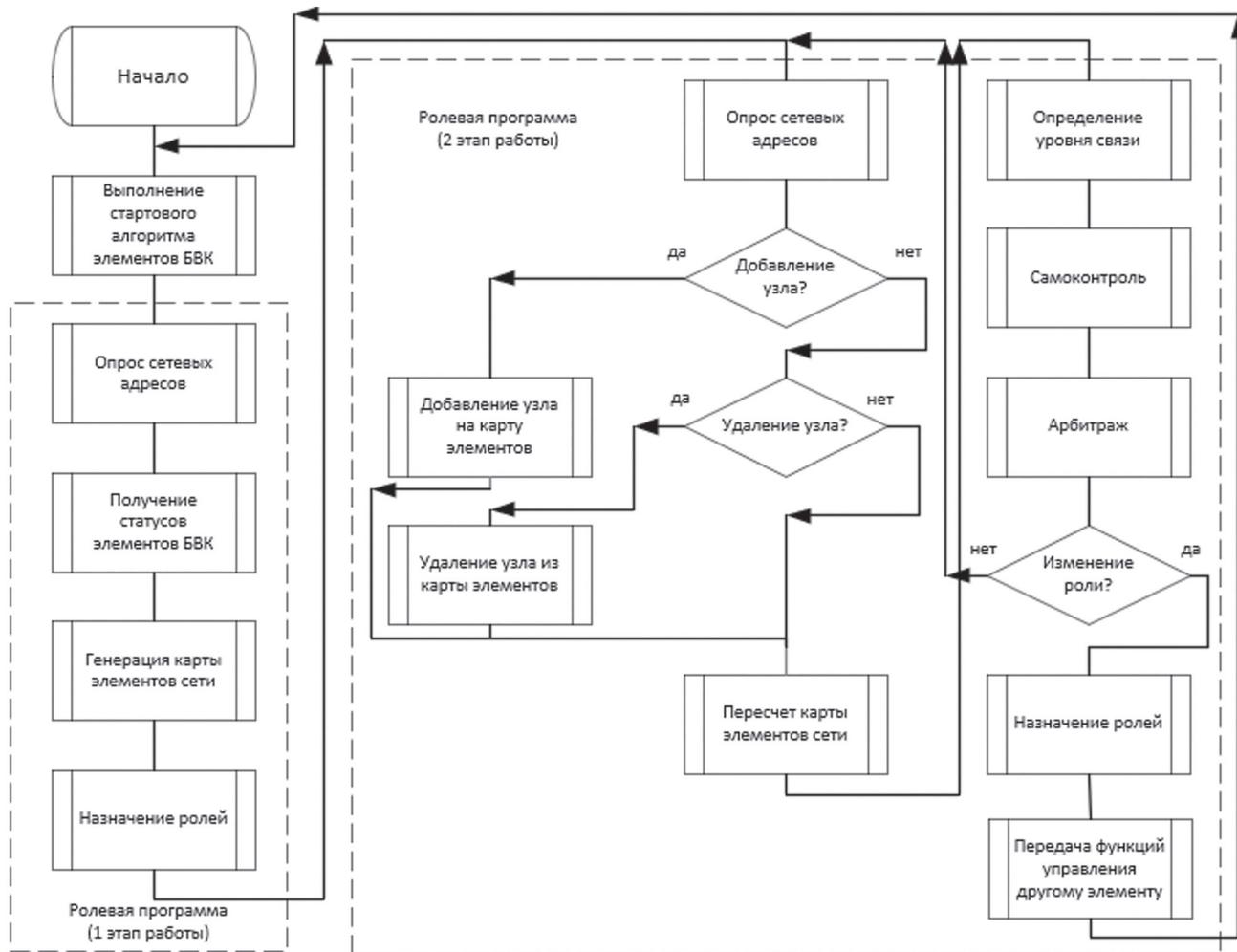


Рис. 3

Алгоритм функционирования рабочей машины (рис. 4) содержит такие этапы:

- 1) получение координаты элемента по GPS после старта рабочей программы;
- 2) получение опросного сигнала от управляющего элемента;
- 3) после выполнения процедуры опроса — получение командного слова от управляющего элемента;

4) при изменении роли элемента — выполнение загрузки рабочей программы и рестарт.

Для общения элементов кластера используются команды.

В команде управляющего элемента рабочей машины (рис. 5) содержится следующая информация:

- *Work* — бит, отвечающий за режим работы;
- *TempNum* — переменная, означающая текущую роль элемента в системе;
- *KvCount* — счетчик квитирования, показывающий, сколько раз „пчела“ должна передать ответ;
- *AdmNk*, *AdrRnk*, *AdrRh* — адреса основных элементов БВК;
- *INT* — поле векторного прерывания;

— *Резерв* — поле резерва;  
 — *КС* — контрольная сумма.  
 Команда ответа рабочей машины (рис. 6) состоит из следующих полей:  
 — *Заряд* — уровень оставшегося заряда (в процентах);  
 — *NMEA* — координаты элемента;  
 — *Бит исправности* — результат выполнения встроенного самоконтроля;  
 — *KvCount* — счетчик ответов, записывается управляющим элементом;  
 — *Num* — роль элемента в системе по умолчанию;  
 — *Резерв* — резервная ячейка.  
 — *КС* — контрольная сумма.  
 Алгоритм работы накопителя отличается от алгоритма функционирования „пчелы“ только выполняемой ролевой программой, а также командами и статусами. Командное слово содержит те же поля, что и для „пчелы“, но отличается наличием ячейки „Индикатор свободной памяти“, которая показывает свободное место в накопителе для записи информации. Ответная команда статуса накопителя для управляющего элемента приведена на рис. 7.

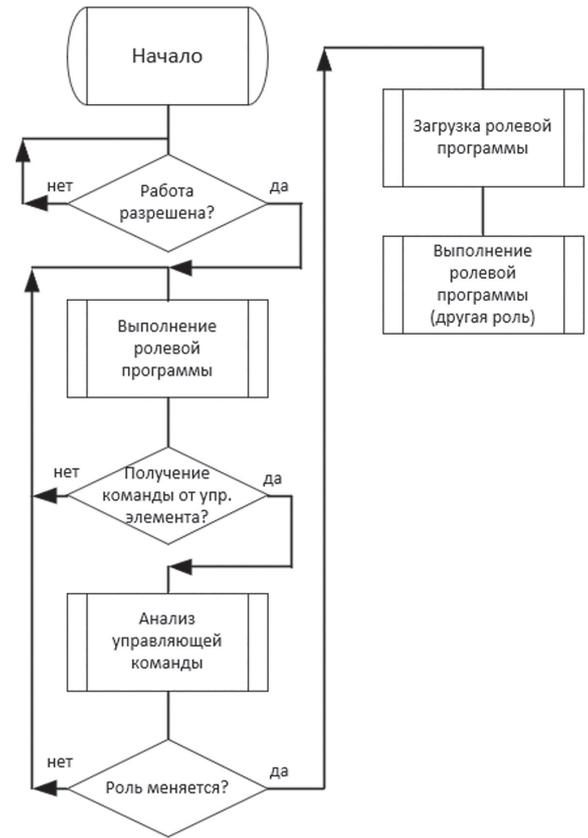


Рис. 4

Work	TempNum	KvCount	AdrNk	AdrRnk	AdrRh	INT	Резерв	КС
------	---------	---------	-------	--------	-------	-----	--------	----

Рис. 5

Заряд	NMEA	Бит исправности	KvCount	Num	Резерв	КС
-------	------	-----------------	---------	-----	--------	----

Рис. 6

Заряд	NMEA	Бит исправности	KvCount	Num	Индекс свободной памяти	Резерв	КС
-------	------	-----------------	---------	-----	-------------------------	--------	----

Рис. 7

**Результаты и их обсуждение.** Проведенные экспериментальные исследования позволяют лучше понять факторы, влияющие на время выполнения алгоритма реконфигурации беспроводного вычислительного кластера: размер кластера (количество элементов) и внесение дополнительных параметров (настроек) для ролей. Чтобы минимизировать ошибку загрузки центрального процессора, вызванную использованием сторонних программ, каждый сценарий был исполнен 100 раз. После этого было рассчитано среднее значение из этих 100 итераций.

Влияние размера кластера на среднее время выполнения оценивалось для 7 (~7,36 мс), 10 (~10,64), 20 (~50,47), 25 (~247,34) элементов. Дополнительные параметры для ролей не устанавливались.

Исходя из анализа результатов был сделан вывод, что рост размеров кластера ведет к увеличению времени, необходимого для выполнения алгоритма реконфигурации. Это обусловлено тем, что с увеличением числа элементов для опроса возрастает и количество вычислений для

определения суммарных расстояний между этими элементами. Следовательно, больший объем вычислений требует больше времени.

Чтобы оценить, как дополнительные параметры ролей влияют на систему, было принято решение использовать средний размер элементов в кластере, состоящем из 10 элементов. При этом все элементы находились в одинаковых начальных позициях. В качестве исследуемых параметров были выбраны объем внутреннего хранилища для роли „Накопитель“ и производительность процессора для роли „Управляющий элемент“. Среднее время выполнения при одном дополнительном параметре составило  $\sim 24,36$  мс, при двух —  $67,72$ , без дополнительных параметров —  $14,43$ .

На основании полученных результатов сделан вывод, что добавление элементов и внесение дополнительных параметров повышает сложность алгоритма и увеличивает время выполнения алгоритма реконфигурации.

Стоит отметить, что увеличение числа элементов и добавление дополнительных параметров увеличивает нагрузку на центральный процессор элемента с текущей ролью „Управляющий элемент“. Это необходимо учитывать при построении системы беспроводного вычислительного кластера с помощью алгоритма реконфигурации ролей.

С целью визуализации работы алгоритма написана программа для моделирования работы. Интерфейс программы представлен на рис. 8.

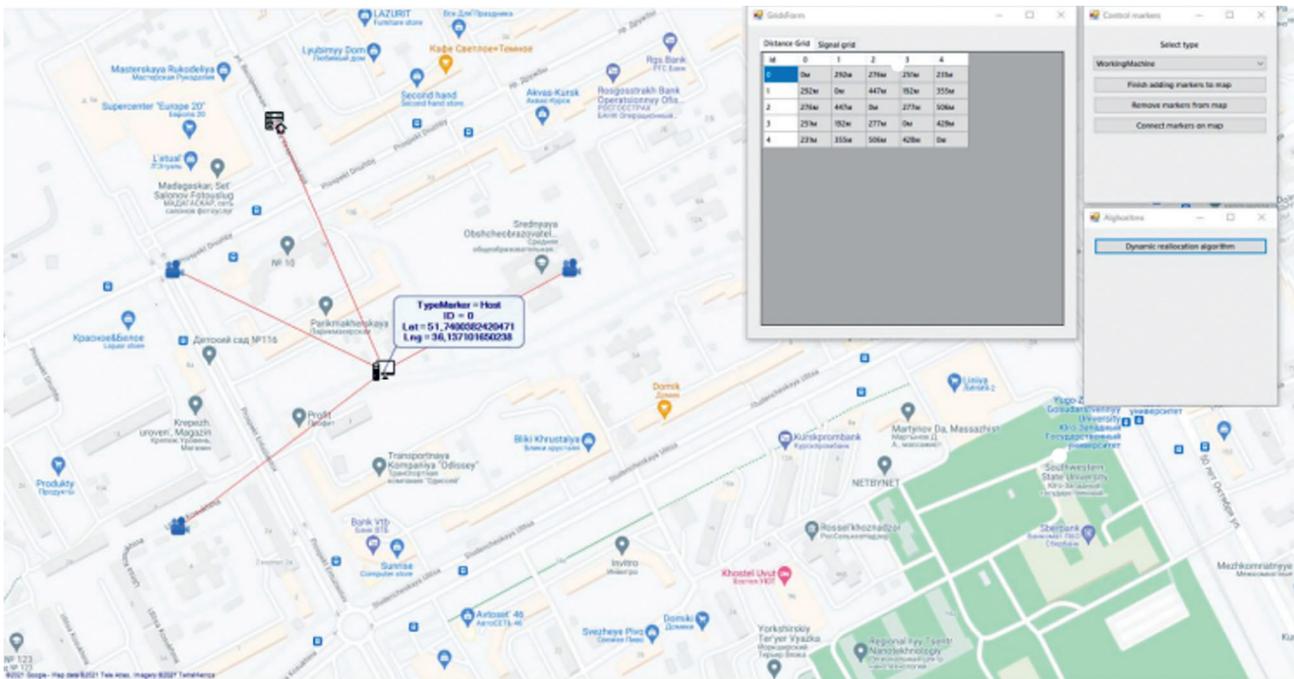


Рис. 8

В настоящей работе описывается алгоритмическая структура беспроводного вычислительного кластера, основанная на динамическом распределении ролей между его элементами. Основой для распределения элементов беспроводного кластера служит концепция, согласно которой каждый элемент кластера занимает свою „орбиту“ и выполняет определенные функции. Алгоритм, предложенный в статье, может быть использован при разработке программного обеспечения для создания собственной архитектуры беспроводного вычислительного кластера.

Использование этих алгоритмов для беспроводных вычислительных кластеров способствует повышению их надежности в различных условиях. Предложенный алгоритм может быть интегрирован с уже существующими системами для создания умной системы управления беспроводным кластером [14—18].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муравьев К. А., Алябьев И. О., Синютина Д. С., Шушуев А. И. Алгоритмическое проектирование беспроводных сенсорных сетей // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4(32). С. 79–89. DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-9.
2. Павлов А. Н., Павлов Д. А., Умаров А. Б. Метод оценивания показателей живучести бортовых систем малых космических аппаратов в условиях изменяющихся режимов функционирования и деструктивных воздействий // Труды МАИ. 2021. № 120. С. 92–101.
3. Алешин Е. Н., Зиновьев С. В., Копкин Е. В., Осипенко С. А., Павлов А. Н., Соколов Б. В. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. С. 357–363.
4. Татарникова Т. М., Бимбетов Ф., Горина Е. В. Алгоритм роя пчел выбора головных узлов кластеров беспроводной сенсорной сети // Изв. СПбГЭТУ „ЛЭТИ“. 2022. Т. 15, № 3. С. 15–22.
5. Борзов Д. Б., Чернышев А. А., Сизов А. С., Соколова Ю. В. Методика и алгоритм построения вычислительной сети на основе беспроводного протокола // Труды МАИ. 2021. № 121. DOI: 10.34759/trd-2021-121-20.
6. Глушков В. Н., Миронов М. Е. Повышение производительности беспроводных кластеров за счет оптимизации ролевого распределения // Вычислительные технологии. 2024. № 6. С. 250–265.
7. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Bogatyrev A. V. The Probability of Timely Redundant Service in a Two-Level Cluster of a Flow of Requests that is Heterogeneous in Functionality and Allowable Delays // Communications in Computer and Information Science. 2023. Vol. 1748. P. 122–134.
8. Богатырев В. А., Богатырев А. В. Оптимизация резервированного распределения запросов в кластерных системах реального времени // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 7. С. 495–502.
9. Татарникова Т. М., Бимбетов Ф., Горина Е. В. Алгоритм энергоэффективного взаимодействия узлов беспроводной сенсорной сети // Труды МАИ. 2022. № 131. С. 55–63.
10. Галушина Т. Ю., Николаева Е. А., Красавин Д. С., Летнер О. Н. Применение методов машинного обучения для классификации резонансного движения астероидов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 76. С. 87–100.
11. Богатырев В. А., Богатырев С. В., Богатырев А. В. Оценка готовности компьютерной системы к своевременному обслуживанию запросов при его совмещении с информационным восстановлением памяти после отказов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3(145). С. 608–617.
12. Красавин Д. С., Александрова А. Г., Томилова И. В. Применение искусственных нейронных сетей в исследовании динамической структуры околоземного орбитального пространства // Изв. вузов. Физика. 2021. Т. 64, № 10. С. 38–43.
13. Татарникова Т. М. Статистические методы исследования сетевого трафика // Информационно-управляющие системы. 2018. № 5(96). С. 35–43.
14. Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V., Bogatyrev S. V. Redundant servicing of a flow of heterogeneous requests critical to the total waiting time during the multi-path passage of a sequence of info-communication nodes // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2020. Vol. 12563. P. 100–112.
15. Basford P. J., Johnston S. J., Perkins C. S., Garnock-Jones T., Tso F. P., Pezaros D., Mullins R. D., Yoneki E., Singer J., Cox S. J. Performance analysis of single board computer clusters // Future Generation Computer Systems. 2020. Vol. 102. P. 278–291.
16. Монтлевич В. М., Попов А. Д. Математическая модель размещения виртуальных машин на физических серверах вычислительных сетей // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. 2020. Т. 11, № 2. С. 125–131.
17. Воробьев А. А., Данг С. Б. Формализация задач оптимизации размещения виртуальных машин и распределения сетевых ресурсов в облачной вычислительной системе // Системы управления и информационные технологии. 2016. № 3. С. 28–32.
18. Пальчевский Е. В., Халиков А. Р. Равномерное распараллеливание сетевой нагрузки по физическим серверам кластера // „Актуальные вопросы современных научных исследований“: Матер. Междунар. науч.-практич. конф. М., 2017. № 1. С. 119–122.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Денис Сергеевич Неструев**

— аспирант; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники; E-mail: nestrujev98@mail.ru

**Дмитрий Борисович Борзов**

— д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники; доцент; E-mail: borzovdb@mail.ru

Поступила в редакцию 22.04.24; одобрена после рецензирования 16.06.24; принята к публикации 23.08.24.

## REFERENCES

1. Muravyev K.A., Alyabyev I.O., Sinyutina D.S., Shushuev A.I. *Reliability and quality of complex systems*, 2020, no. 4(32), pp. 79–89, DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-9. (in Russ.)
2. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Umarov A.B. *Trudy MAI*, 2021, no. 120, pp. 92–101. (in Russ.)
3. Aleshin E.N., Zinoviev S.V., Kopkin E.V., Osipenko S.A., Pavlov A.N., Sokolov B.V. *Sistemnyy analiz organizatsionno-tekhnicheskikh sistem kosmicheskogo naznacheniya* (System Analysis of Organizational and Technical Systems for Space Purposes), St. Petersburg, 2018. pp. 357–363. (in Russ.)
4. Tatarnikova T.M., Bimbetov F., Gorina E.V. *Izvestiya SPbSETU "LETI"*, 2022, no. 3(15), pp. 15–22. (in Russ.)
5. Borzov D.B., Chernyshev A.A., Sizov A.S., Sokolov Yu.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 121, DOI: 10.34759/trd-2021-121-20. (in Russ.)
6. Glushkov V.N., Mironov M.E. *Computing Technologies*, 2024, no. 6, pp. 250–265. (in Russ.)
7. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. *Communications in Computer and Information Science*, 2023, vol. 1748, pp. 122–134.
8. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. *Information Technologies*, 2015, no. 7(21), pp. 495–502. (in Russ.)
9. Tatarnikova T.M., Bimbetov F., Gorina E.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 131, pp. 55–63. (in Russ.)
10. Galushina T.Yu., Nikolaeva E.A., Krasavin D.S., Letner O.N. *Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and mechanics*, 2022, no. 76, pp. 87–100. (in Russ.)
11. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, no. 3(23), pp. 608–617. (in Russ.)
12. Krasavin D.S., Alexandrova A.G., Tomilova I.V. *News of universities. Physics*, 2021, no. 10(64), pp. 38–43. (in Russ.)
13. Tatarnikova T.M. *Information and control systems*, 2018, no. 5(96), pp. 35–43. (in Russ.)
14. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. *Lecture Notes in Computer Science* (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2020, vol. 12563, pp. 100–112. (in Russ.)
15. Basford P.J., Johnston S.J., Perkins C.S., Garnock-Jones T., Tso F.P., Pezaros D., Mullins R.D., Yoneki E., Singer J., Cox S.J. *Future Generation Computer Systems*, 2020, vol. 102, pp. 278–291.
16. Montevich V.M., Popov A.D. *Bulletin of Samara University. Economics and management*, 2020, no. 2(11), pp. 125131. (in Russ.)
17. Vorobyov A.A., Dang S.B. *Management systems and information technologies*, 2016, no. 3, pp. 28–32. (in Russ.)
18. Palchevsky E.V., Khalikov A.R. *Aktual'nyye voprosy sovremennykh nauchnykh issledovaniy* (Uniform Parallelization of Network Load across Physical Cluster servers — Topical Issues of Modern Scientific Research), Materials of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, 2017, no. 1, pp. 119–122.

## DATA ON AUTHORS

- Denis S. Nestruev** — Post-Graduate Student; Southwest State University, Department of Computer Engineering; E-mail: nestruev98@mail.ru
- Dmitriy B. Borzov** — Dr. Sci., Professor; Southwest State University, Department of Computer Engineering; Associate Professor; E-mail: borzovdb@mail.ru

Received 22.04.24; approved after reviewing 16.06.24; accepted for publication 23.08.24.

---

---

# 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 536.248.2  
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-853-866

### ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ИНИЦИАТОРА НА ПРОЦЕСС ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

В. А. Старикова<sup>1,2\*</sup>, А. В. Перминов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup> Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия

\* [scherbackova.vict@mail.ru](mailto:scherbackova.vict@mail.ru)

**Аннотация.** Представлена математическая модель инициирования оптического пробоя в оптическом волокне. Для повышения управляемости процесса возникновения плазменного очага и структуры дефектов, формируемых им, исследованы различные варианты материалов инициатора. В результате расчетов получены зависимости различных характеристик фронта плазмообразования в волокне от термофизических свойств материалов инициатора. Даны рекомендации по проведению экспериментальных исследований. Результаты настоящей работы могут быть применены для прогнозирования минимальных мощностей вводимого в волокно оптического излучения, необходимых для возникновения оптического пробоя в волокне при использовании различных материалов инициатора.

**Ключевые слова:** оптический пробой, плазма, коэффициент теплопроводности

**Благодарность:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00169: <https://rscf.ru/project/23-21-00169/>.

**Ссылка для цитирования:** Старикова В. А., Перминов А. В. Влияние материала инициатора на процесс возникновения оптического пробоя в оптическом волокне // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 853–866. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-853-866.

#### INFLUENCE OF INITIATOR MATERIAL ON THE PROCESS OF OPTICAL BREAKDOWN IN OPTICAL FIBER

V. A. Starikova<sup>1,2\*</sup>, A. V. Perminov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

<sup>2</sup> Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company PJSC, Perm, Russia

\* [scherbackova.vict@mail.ru](mailto:scherbackova.vict@mail.ru)

**Abstract.** A mathematical model of optical breakdown initiation in optical fiber is presented. To increase the controllability of the plasma hearth formation process and the structure of defects formed by it, various variants of initiator materials are studied. As a result of calculations, dependences of various characteristics of the plasma formation front in the fiber on the thermophysical properties of the initiator materials are obtained. Recommendations for conducting experimental studies are given. It is assumed that the results can be applied to predict the minimum power of optical radiation injected into the fiber, which is necessary for optical breakdown occurrence a fiber when using various initiator materials.

**Keywords:** optical breakdown, plasma, thermal conductivity coefficient

**Acknowledgments:** the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-21-00169: <https://rscf.ru/project/23-21-00169/>.

**For citation:** Starikova V. A., Perminov A. V. Influence of initiator material on the process of optical breakdown in optical fiber. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 10. P. 853–866 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-853-866.

**Введение.** В 1987 г. научной группой под руководством Кашьяпа впервые был описан эффект оптического пробоя, который представляет собой возникновение плазменного очага в волоконно-оптической линии и последующее его распространение навстречу источнику излучения [1–3]. При этом происходит разрушение значительного участка оптоволоконных линий. Данный эффект инициируется в локальной точке нагрева, где резко возрастают поглощение энергии излучения и температура в сердцевине волокна вплоть до температуры возникновения плазмы в кварцевом стекле. Плазменный очаг распространяется по оптическому волокну, расплавляя сердцевину и формируя квазипериодическую структуру дефектов, излучая при этом видимый белый свет.

В настоящее время изучение процессов пробоя оптического волокна и движения плазменной искры по нему является одной из актуальных задач в области разработки оптоволоконных устройств. Особый интерес представляют квазипериодические структуры, возникающие в результате прохождения плазменной искры. Эти структуры могут быть использованы в качестве сенсорного, рассеивающего или фильтрующего излучение элемента.

В работах отечественных и зарубежных исследователей, научный интерес которых прикован к эффекту оптического пробоя, описываются физическая сущность эффекта, последствия для оптических волокон, а также методы его изучения. В [4] исследуется оптический пробой в оптическом волокне с оболочкой уменьшенной толщины, обеспечивающей расширение области плазмы и уменьшение ее плотности. В работе описывается взаимодействие плазменного очага с материалом оптического волокна.

Механизм возникновения оптического пробоя в волоконном световоде тесно связан с нелинейным поглощением кварцевого стекла [5–7]. Одномерное уравнение теплопроводности, с учетом изменения оптической мощности вдоль длины оптического волокна, было использовано при моделировании процесса и расчете скорости движения плазменного очага [8]. Полученные значения скорости хорошо согласуются со значениями, полученными в ходе экспериментальных исследований. Результаты расчета показали также зависимость скорости плавления сердцевины волокна от оптической мощности излучения, вводимого в оптическое волокно. В статьях [9, 10] описаны формирование полостей в волокнах и динамика их распространения явления по волокну.

В целом на фундаментальном уровне наиболее значимый вклад в исследование эффекта плавления волокна был внесен работами Y. Shuto [6, 7, 9, 10], а также S. Todoroki [11–14]. Последний посвятил свои исследования экспериментальному подтверждению теоретических наработок. Наиболее интересной в контексте настоящего исследования является работа [11], в которой экспериментально исследовано время инициации эффекта плавления волокна. Минимальное время запуска реакции составило 0,18 с, а минимальная мощность, при которой удалось запустить реакцию в волокне SMF-28, составила 0,4 Вт [13, 14].

Статьи [15–17] посвящены исследованию инициации эффекта оптического пробоя при наличии электрического разряда или загрязнении коннекторов оптического волокна. Эти работы позволяют углубить понимание явления плавления волокна и могут быть полезны для разработки мер по его предотвращению или управлению.

Ввиду сложности процесса возникновения плазмы и последующего формирования структуры дефектов процесс при исследовании был разделен на два этапа. Первый этап включает в себя инициирование оптического пробоя и формирование плазменного очага. Наблюдаемое время до начала движения плазменной искры составляет 1–2 с [9], однако моделирование данного процесса показало время инициирования менее 1 мс [10, 12, 13], поэтому заданное общее время первого этапа составило менее 1 мс. Второй этап включает в себя процесс движения плазменного очага по волокну с формированием в нем дефектов и не ограничен по времени.

В настоящей статье представлена математическая модель первого этапа плавления (пробоя) оптического волокна, основанная на уравнении теплопроводности. Ряд положений математической модели, алгоритм расчета и некоторые результаты были описаны авторами в [18–20]. В настоящей статье исследуется влияние теплофизических характеристик инициатора и оптического волокна на процесс пробоя волокна и образование в его сердцевине плазмен-

ного очага. Это исследование может быть полезно для понимания механизмов возникновения оптического пробоя, что позволит определить параметры инициатора, влияющие на процесс возникновения пробоя, и в дальнейшем повысить управляемость эффектом для создания периодических структур дефектов. Процесс движения плазменной искры по волокну на данном этапе не рассматривался. В рамках модели исследуется распределение температурного поля в волокне, которое считается твердым телом, т.е. фазовыми переходами пренебрегается. Все расчеты выполнялись в программном пакете Comsol Multiphysics, предназначенном для решения параболических интегрально-дифференциальных уравнений, поддерживающих возможность модернизации встроенных алгоритмов и методов расчета, например, за счет введения аналитических функций, скриптов.

**Описание математической модели.** Математическая модель возникновения плазменного очага описывает момент соприкосновения оптического волокна, в котором распространяется монохромное оптическое излучение, и инициатора. При этом соприкосновении резко возрастает температура в области сердцевинки оптического волокна и формируется плазменный очаг. Поскольку оптическое волокно имеет цилиндрическую форму, в модели использованы цилиндрические координаты (ось  $z$  направлена вдоль оси волокна,  $r$  — по его радиусу) и осесимметричная постановка задачи.

Расчетная область (рис. 1) представляет собой четыре элемента: отрезок одномодового волокна со ступенчатым профилем показателя преломления SMF-28e, состоящего из сердцевинки (1), оболочки (2) и защитного покрытия (3). Волокно вплотную прижато к инициатору (4) — его материал будет изменяться в ходе исследования. В обозначениях границ контактов  $S_{12}$ ,  $S_{14}$ ,  $S_{23}$ ,  $S_{24}$ ,  $S_{34}$  индексы соответствуют номерам соприкасающихся элементов. Наружная граница волокна и металлической пластины с окружающей средой обозначена  $S$ .

В рамках математической модели распределение температурного поля  $T(r, z, t)$  во всей расчетной области (рис. 1) описывается уравнением теплопроводности [21]:

$$\rho_i C_{Pi} \frac{\partial T}{\partial t} = k_i \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q, \quad (1)$$

где  $i = 1-4$  — номер элемента в расчетной области (рис. 1);  $\rho_i$  — плотность [кг/м<sup>3</sup>];  $C_{Pi}$  — удельная теплоемкость [Дж/(кг·К)];  $k_i$  — теплопроводность материала [Вт/(м·К)];  $Q$  — источник тепла, интенсивность которого определяется заводимым в волокно оптическим излучением [Вт/м<sup>3</sup>].

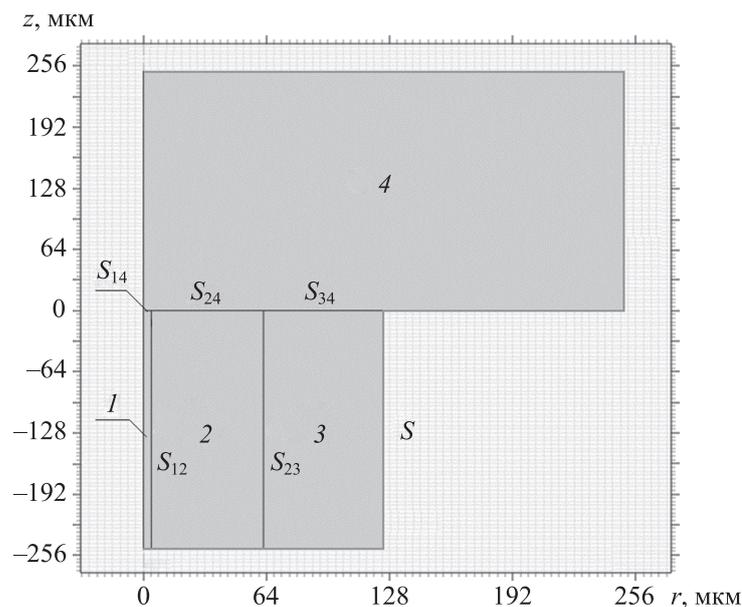


Рис. 1

Слагаемое  $Q$  в уравнении (1) описывает тепловыделение, возникающее из-за взаимодействия оптического излучения, распространяющегося по волокну, с инициатором, который вплотную прижат к торцу волокна. Полагается, что в месте контакта торца волокна и пластины воздушного зазора нет. После отражения в сердцевине образуется стоячая волна, энергия которой нелинейно поглощается веществом вблизи границы контакта. Интенсивность этого источника тепла зависит от оптической мощности, длины волны излучения и свойств волокна и рассчитывается по формуле:

$$Q = \alpha \frac{P}{A_{\text{eff}}} \Gamma, \quad (2)$$

где  $\alpha = \alpha_0 + \alpha_e$  — коэффициент поглощения волокна [ $\text{м}^{-1}$ ],  $P$  — вводимая мощность излучения [ $\text{Вт}$ ];  $\Gamma$  — стандартное распределение Гаусса;  $A_{\text{eff}}$  — эффективная площадь модового пятна [ $\text{м}^2$ ].

Коэффициент поглощения  $\alpha$  представляет собой сумму коэффициента поглощения при нормальных условиях  $\alpha_0 \approx 1 \text{ м}^{-1}$  [5] (при температурах, близких к 293 К) и коэффициента поглощения электронного газа  $\alpha_e$ , появившегося при температуре выше 1273 К. При температуре выше 1273 К происходит термическая ионизация молекул легирующих примесей оптического волокна и возникает электронный газ, коэффициент поглощения которого равен [22]:

$$\alpha_e = \frac{k_B n_1}{\sqrt{2}} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\mu_0 c_0 \sigma}{k_0 n_1^2} \right)^2} - 1 \right]^{1/2} \sim \frac{\mu_0 c_0 \sigma}{2 n_1} = \frac{\mu_0 c_0}{2 n_1} e \mu_e n_p \exp \left( -\frac{E_f}{k_B T} \right), \quad (3)$$

где  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $n_1$  — коэффициент преломления в сердцевине;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $c_0$  — скорость света в вакууме;  $k_0$  — волновое число в вакууме;  $n_p = 1,72 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$  — концентрация легирующей примеси при нормальной температуре;  $\mu_e$  — дрейфовая подвижность электронов, варьируемая от 7 до 63  $\text{см}^3/\text{В} \cdot \text{с}$ , в расчетах полагалось  $\mu_e = 50 \text{ см}^3/\text{В} \cdot \text{с}$  [22];  $E_f = 2,5 \text{ эВ}$  — энергия формирования ионов легирующей примеси.

Эффективная площадь модового пятна в (3) рассчитывается с помощью эффективного радиуса для каждой из длин волн [23]:

$$A_{\text{eff}} = \pi a^2 \left( 0,65 + \frac{1,619}{V^{3/2}} + \frac{2,879}{V^6} \right)^2, \quad (4)$$

(где  $a$  — радиус сердцевины волокна;  $V$  — нормированная частота, определяющая число мод заданного излучения в данной геометрии оптического волокна), т. е. зависит от длины волны излучения и показателей преломления сердцевины и оболочки.

На границах  $S_{12}, S_{14}, S_{23}, S_{24}, S_{34}$  соприкасающихся элементов расчетной схемы используются условия сопряжения или баланса тепловых потоков:

$$\left( k_i \frac{\partial T}{\partial r} l_r + k_i \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right)_{s_{ij}} = \left( k_j \frac{\partial T}{\partial r} l_r + k_j \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right)_{s_{ij}}, \quad (5)$$

где  $l_r$  и  $l_z$  — проекции единичного вектора нормали к соответствующим поверхностям на координатные оси  $z$  и  $r$ . Внешняя граница расчетной области  $S$  считается идеально теплопроводной и для нее задана температура окружающей среды  $T_0 = 293 \text{ К}$ .

В расчетах физические свойства оптического волокна задавались согласно спецификации волокна SMF-28e. Теплофизические параметры материалов (плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность) задавались для каждого элемента расчетной области как некоторые функции температуры. Вид этих функций выбирался из библиотеки Comsol Multiphysics.

**Выбор материала инициатора.** В качестве материалов для инициатора (рис. 1, 4) были выбраны: дюралюминий, титан, дерево (дуб) и базальт — распространенные материалы с различными теплофизическими характеристиками.

Дюралюминий — сплав алюминия и меди, усиленный легирующими присадками. В исследовании был выбран дюралюминий Д16, регламентированный ГОСТ 4784-97. Этот сплав широко распространен в различных отраслях промышленности и производства благодаря своим прочности и малому весу. Кроме этого, в ранее проведенных нами экспериментальных исследованиях [19] был использован инициатор из дюралюминия.

Титан также широко используется в различных отраслях промышленности, в частности аэрокосмической, благодаря уникальному сочетанию высокой прочности, низкой плотности и теплопроводности, а также способности выдерживать экстремальные температуры. В исследовании был выбран титан ВТ-1-00 ГОСТ 19807-91.

Также в экспериментальных исследованиях был использован инициатор из древесины (дуба). Его теплофизические свойства в определенной степени зависят от породы и внешних условий. В расчетах принимались абсолютно сухое состояние древесины и соответствующие ему параметры.

Базальт, излившаяся вулканическая горная порода основного состава (с содержанием кремнезема 44–53 %), является самой распространенной магматической горной породой (занимает около 40 % на континентах и свыше 90 % — на дне океанов). При выборе материала инициатора одним из значимых свойств базальта стало то, что он не выделяет вредных веществ при нагревании, т.е. безопасен для экспериментальных исследований [24, 25]. Стоит отметить, что его теплофизические свойства (для исследования взяты усредненные значения) зависят от структуры породы, слагаемых ее минералов и пустот, которые образуются из газовых флюидов, содержащихся в магме.

Теплофизические характеристики материалов, а именно коэффициент теплопроводности  $k$ , плотность вещества  $\rho$  и удельная теплоемкость  $c_p$ , необходимые для расчетов, были взяты из библиотеки Comsol. Данные характеристики представлены сложными функциями от температуры 293–5000 К, на границах этого диапазона функции приравняются к константам. В табл. 1 представлены константы теплофизических характеристик при граничных температурах для каждого из материалов инициатора.

Таблица 1

Параметр	Дюралюминий		Титан		Базальт		Дерево	
	293 К	5000 К	293 К	5000 К	293 К	5000 К	293 К	5000 К
$k$ , Вт/(м·К)	120	171	22	29	2,50	1,02	00,40	0,043
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	2780	2675	4500	4390	2900	2670	720	690
$c_p$ , Дж/(кг·К)	850	1150	520	845	860	1100	1505	2400

Как видно из табл. 1, для всех материалов, за исключением базальта, коэффициент теплопроводности растет с увеличением температуры. Плотность всех материалов снижается при увеличении температуры, что объясняется термическим расширением и изменением внутренней структуры вещества. Удельная теплоемкость материалов растет с увеличением температуры, это объясняется тем, что при повышении температуры вещества колебательные движения его атомов и молекул усиливаются, на что расходуется все большее количество энергии. Следовательно, чем выше температура, тем больше теплоты необходимо передать веществу, чтобы изменить его температуру на единицу.

**Исследование влияния материала инициатора.** В ходе математического моделирования на основании уравнений (1)–(5) было рассчитано температурное поле в оптическом волокне, плотно прижатом к инициатору.

Согласно полученным результатам, в начале процесса тепло возникает на границе волокно–инициатор  $S_{14}$ : сердцевина оптического волокна нагревается и происходит постепенное

плавление, выпаривание и образование плазмы. Для кварцевого стекла были определены границы температурных фронтов, соответствующих областям, где возможно возникновение различных фазовых состояний данного материала (жидкое, газообразное или плазма). Температуре плавления кварца (оптического волокна) соответствует значение 1440 К, парообразованию в волокне — 2706 К, образование плазмы начинается с 5000 К.

При прогреве волокна область плазмообразования расширяется, т. е. наблюдается движение температурного фронта, соответствующего границе области плазмообразования. Для положения фронта плазмы можно выделить три характерных времени, отсчитываемых от начала подачи излучения в волокно:  $t_0$  — время возникновения области плазмообразования;  $t_1$  — время достижения фронтом плазмообразования границы сердцевина–оболочка  $S_{12}$ ;  $t_2$  — время релаксации фронта плазмообразования, когда движение фронта плазмообразования прекращается, а фронты жидкой и газообразной фазы волокна замедляют движение. При этом достигается максимальный размер области плазмообразования, которая внутри волокна представляет собой полуэллипс, с полуосями, соответствующими координатам  $r_{\max}$  и  $z_{\max}$ .

На рис. 2 приведен пример распределения температурного поля за 1 мс в области соприкосновения оптического волокна и инициатора при разных коэффициентах теплопроводности:  $a$  — 18,  $b$  — 200 Вт/(м·К).

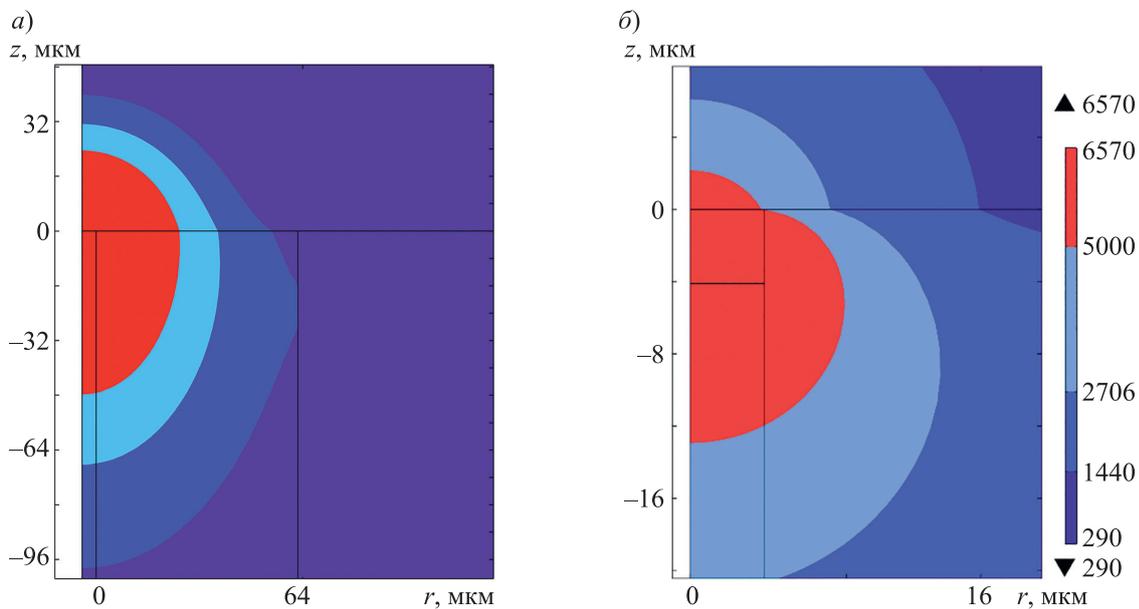


Рис. 2

Предполагается, что оптический пробой, как процесс движения плазменной искры, начинается во временном интервале от  $t_1$  до  $t_2$ , когда фронт плазмообразования преодолевает границу  $S_{12}$  сердцевина–оболочка, а форма плазменного очага стремится к стабильному состоянию. В ходе расчетов определялась минимальная мощность  $P_{\min}$  оптического излучения в волокне, необходимая для формирования устойчивой формы плазменного очага и возникновения оптического пробоя, как процесса движения плазмы по оптическому волокну с последующим переплавлением сердцевинки. Этой мощности соответствует ситуация, когда фронт плазменного очага стабилизируется на границе сердцевина–оболочка.

Таким образом, для каждого материала инициатора были рассчитаны следующие выходные параметры модели:

- характерные значения времени для фронта плазмообразования в волокне  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ;
- максимальные размеры области плазмообразования  $r_{\max}$  и  $z_{\max}$ ;
- минимальная оптическая мощность излучения  $P_{\min}$ , необходимая для возникновения оптического пробоя.

В табл. 2 представлены результаты расчета времени, размеров плазменного очага и минимальной мощности для каждого из исследуемых материалов.

Таблица 2

Параметр	Дюралюминий	Титан	Дерево	Базальт
$t_0$ , мкс	0,17	0,16	0,17	0,17
$t_1$ , мкс	0,73	0,65	0,48	0,55
$t_2$ , мкс	2,14	22,21	0,82	2,01
$r_{\max}$ , МКМ	9	24	115	110
$z_{\max}$ , МКМ	13	31	667	536
$P_{\min}$ , мВт	270	110	35	48

Для расчета значений  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $r_{\max}$  и  $z_{\max}$  были выбраны время 1 мс и оптическая мощность излучения 1 Вт. Такие значения были выбраны исходя из экспериментальных исследований, где характерное наблюдаемое время начала движения плазменной искры вдоль волокна составляло примерно 600 мкс, а используемая для инициации разряда мощность равнялась 1–2 Вт [9].

Как видно из табл. 2, наибольшее значение времени возникновения плазмы в оптическом волокне  $t_0$  было получено в случае титанового инициатора, а наименьшее — при расчете с инициатором из базальта. Необходимо отметить, что время возникновения плазмы  $t_0$  практически одинаково для всех материалов. Это позволяет предположить, что данный параметр слабо зависит от теплофизических свойств материалов инициатора.

Наибольшее значение времени достижения фронтом плазмообразования границы сердцевина–оболочка  $t_1$  было получено при расчете с дюралюминиевым инициатором, а наименьшее — с инициатором из дерева. Как видно из табл. 1, дюралюминий обладает наибольшим коэффициентом теплопроводности, а дерево — наименьшим. Таким образом, можно предположить, что коэффициент теплопроводности  $k$  влияет на время достижения фронтом плазмообразования границы сердцевина–оболочка.

Наибольшее значение времени релаксации  $t_2$  было получено при расчете с титановым инициатором, а наименьшее — при расчете с инициатором из дерева. Как видно из табл. 1, титан обладает наибольшей плотностью и наименьшей удельной теплоемкостью среди представленных материалов, а дерево — наоборот, наименьшей плотностью и наибольшей удельной теплоемкостью. Таким образом, можно предположить, что время релаксации фронта плазмообразования  $t_2$  зависит и от плотности материала  $\rho$ , и от его теплоемкости  $c_p$ .

Наибольшие размеры области плазмообразования были получены при расчете с инициатором из дерева. Как видно из табл. 1, дерево обладает наименьшим коэффициентом теплопроводности, и как следствие, тепло распространяется не в область инициатора, а в область оптического волокна, что приводит к более сильному его нагреву и формированию наибольшей области, достигшей температуры плазмообразования.

Наименьшие размеры области плазмообразования были получены при расчете с дюралюминиевым инициатором, что, в свою очередь, объясняется наибольшим коэффициентом теплопроводности среди исследуемых материалов. В этом случае тепло распространяется в инициаторе, стремительно прогревая слой за слоем, в результате область нагрева в волокне остается наименьшей, по сравнению с другими материалами инициатора. Таким образом, можно предположить, что область плазмообразования зависит от коэффициента теплопроводности  $k$ .

Наибольшее значение минимальной оптической мощности, необходимой для инициирования оптического пробоя, было получено для дюралюминиевого инициатора, а наименьшее — для дерева. Как видно из табл. 1, дюралюминий обладает наибольшим коэффициентом теплопроводности среди представленных материалов, а дерево — наоборот, наименьшим. Таким образом, можно предположить, что минимальная оптическая мощность  $P_{\min}$  зависит от коэффициента теплопроводности  $k$ .

Для проверки предположений о зависимости рассчитываемых характеристик ( $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $r_{\max}$ ,  $z_{\max}$  и  $P_{\min}$ ) от теплофизических ( $k$ ,  $\rho$  и  $c_p$ ) было решено провести дополнительное исследование, при котором изменяться будет только один теплофизический параметр, значения остальных будут соответствовать дюралюминию. Данный материал был выбран в качестве базового для расчетов, поскольку он наиболее часто используется в экспериментах [15, 19].

Для графического представления исследуемых зависимостей использован пакет программ Origin, предназначенный для численного анализа данных и научной графики. Полученные в результате численных расчетов данные представлены в виде аппроксимированных кривых с применением функции усреднения B-Spline.

### Исследование влияния теплофизических параметров инициатора на выходные параметры

**Коэффициент теплопроводности.** Для подтверждения предположения о влиянии коэффициента теплопроводности были проведены дополнительные расчеты, при которых изменялся только коэффициент теплопроводности инициатора  $k$ , а плотность вещества  $\rho$  и коэффициент теплоемкости  $c_p$  соответствовали параметрам дюралюминия. В ходе расчетов коэффициент теплопроводности  $k$  изменялся в пределах 4–200 Вт/(м·К).

Расчеты показали, что время возникновения плазменного очага  $t_0$  в сердцевине волокна при изменении коэффициента теплопроводности изменяется незначительно в пределах от 0,18 до 0,21 мкс. Эта зависимость здесь не приводится.

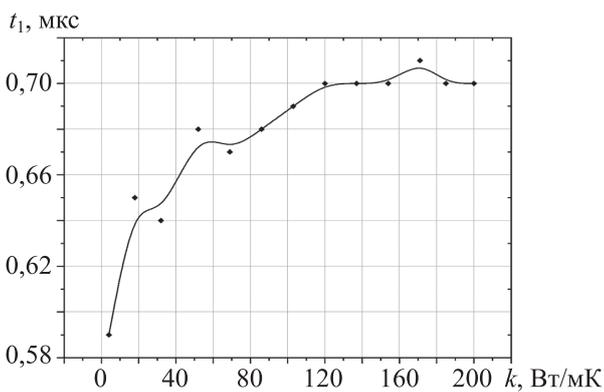


Рис. 3

Зависимость времени достижения фронтом плазмообразования границы сердцевина-оболочка  $t_1$  при увеличении коэффициента теплопроводности  $k$  показана на рис. 3.

Видно, что время достижения фронтом плазмообразования границы сердцевина-оболочка  $t_1$  нелинейно возрастает с увеличением коэффициента теплопроводности  $k$ , асимптотически стремясь к значению 0,7 мкс. Материал инициатора с большим коэффициентом теплопроводности интенсивнее отводит тепло от оптического волокна в тело инициатора. От этого волокно прогревается дольше и соответственно время достижения фронтом плазмообразования

границы сердцевина-оболочка больше. При инициации оптического пробоя волокна целесообразно выбирать материал инициатора с минимальным коэффициентом теплопроводности. Особенно это будет актуально для неидеального соприкосновения торца волокна с инициатором, когда между волокном и инициатором присутствует воздушный зазор, а поверхность инициатора имеет шероховатости.

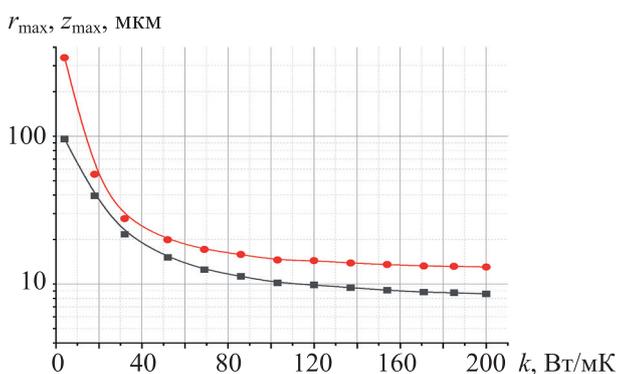


Рис. 4

На рис. 4 приведены графики зависимости максимальных значений радиальной  $r_{\max}$  (красная кривая) и осевой  $z_{\max}$  (черная кривая) координат границы фронта плазмообразования от коэффициента теплопроводности  $k$ .

Видно, что как радиальный  $r_{\max}$ , так и осевой  $z_{\max}$  размеры области плазмообразования уменьшаются с увеличением коэффициента теплопроводности. При увеличении  $k$  графики сближаются друг с другом. При относительно небольших значениях коэффициента теплопроводности радиальный и осевой размеры области плазмы существенно различаются, т. е. область

плазмообразования имеет форму вытянутого вдоль сердцевины волокна полуэллипса. При больших коэффициентах теплопроводности форма области плазмообразования близка к полусферической.

На рис. 5 приведена зависимость минимальной мощности  $P_{\min}$ , необходимой для инициации оптического пробоя волокна, от коэффициента теплопроводности  $k$ .

Минимальная оптическая мощность  $P_{\min}$  нелинейно возрастает с увеличением коэффициента теплопроводности  $k$ . При большем значении  $k$  инициатор прогревается больше и быстрее, отбирая у волокна значительное количество теплоты. Поэтому для инициаторов с более высокой теплопроводностью требуется большая минимальная мощность излучения при иницировании оптического пробоя.

Зависимость времени релаксации  $t_2$  фронта плазмообразования от коэффициента теплопроводности  $k$  представлена на рис. 6. Из рисунка видно, что время релаксации существенно уменьшается с увеличением коэффициента теплопроводности материала инициатора. Это согласуется с результатами, представленными на рис. 4, для размеров плазменного очага. При больших коэффициентах теплопроводности материала инициатора размеры плазменного очага минимальны, следовательно, время достижения таких размеров при заданной мощности излучения также минимально.

Таким образом, все выходные параметры математической модели, за исключением времени возникновения плазмы, зависят от коэффициента теплопроводности материала инициатора.

*Плотность материала инициатора.* В следующей серии расчетов изменялась только плотность инициатора  $\rho$ , коэффициент теплопроводности  $k$  и коэффициент теплоемкости  $c_p$  соответствовали дюралюминию и выбирались из библиотеки Comsol. В табл. 3 представлены результаты расчетов при изменении плотности инициатора в пределах 500–5000 кг/м<sup>3</sup>.

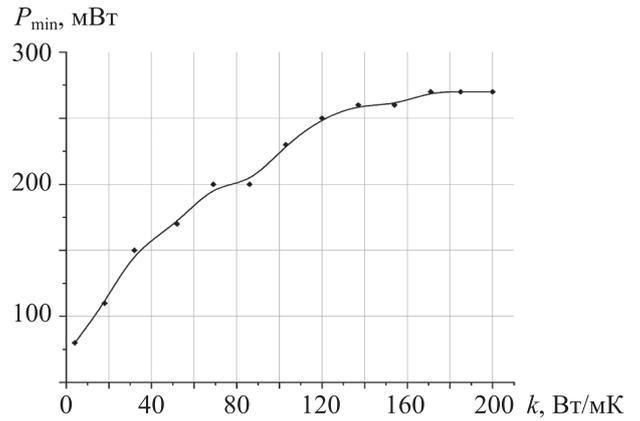


Рис. 5

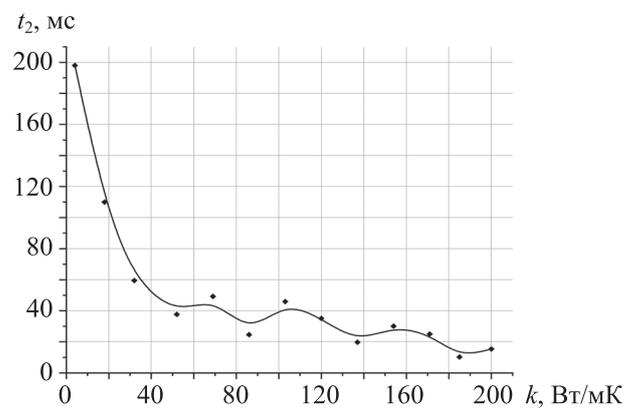


Рис. 6

Таблица 3

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$t_0$ , мкс	$t_1$ , мкс	$t_2$ , мкс	$P_{\min}$ , мВт	$r_{\max}$ , МКМ	$z_{\max}$ , МКМ
500	0,19	0,71	1,96	265	8,82	13,29
1000	0,18	0,71	2,21	270	8,82	13,29
1500	0,18	0,71	2,39	265	8,82	13,29
2000	0,18	0,71	2,20	265	8,83	13,29
2500	0,19	0,71	2,03	270	8,83	13,29
3000	0,18	0,71	2,24	275	8,83	13,29
3500	0,18	0,71	2,12	275	8,83	13,29
4000	0,18	0,71	1,74	265	8,83	13,29
4500	0,18	0,71	1,98	260	8,83	13,28
5000	0,17	0,72	2,12	260	8,83	13,28

Расчеты показали, что время возникновения плазменного очага  $t_0$  в сердцевине волокна, время достижения фронтом плазмообразования границы сердцевина–оболочка  $t_1$ , радиальный  $r_{\max}$  и осевой  $z_{\max}$  размеры области плазмообразования незначительно зависят от плотности инициатора. Время возникновения плазменного очага в сердцевине волокна  $t_0$  составило  $(0,18 \pm 0,006)$  мкс, время достижения фронтом плазмообразования границы сердцевина–оболочка  $t_1$  —  $(0,71 \pm 0,003)$  мкс, радиальный  $r_{\max}$  размер области плазмообразования —  $(8,83 \pm 0,005)$  мкм, осевой  $z_{\max}$  —  $(13,29 \pm 0,004)$  мкм. Данные зависимости здесь не приводятся.

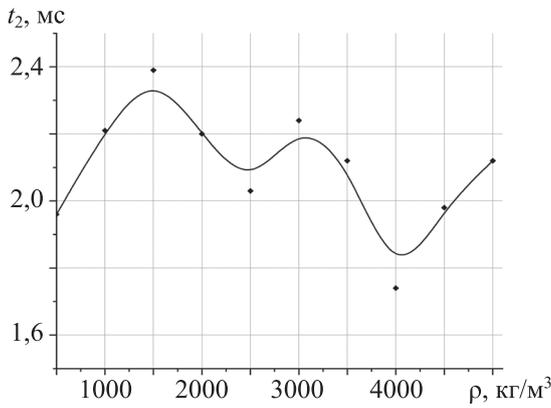


Рис. 7

На рис. 7 приведена зависимость времени релаксации  $t_2$  фронта плазмообразования от плотности инициатора  $\rho$ . Видно, что время релаксации фронта плазмообразования нелинейно зависит от изменения плотности инициатора, среднее время релаксации фронта плазмообразования составило  $(2,10 \pm 0,18)$  мс.

На рис. 8 приведена зависимость минимальной мощности оптического излучения, необходимой для инициации оптического пробоя,  $P_{\min}$  от плотности инициатора  $\rho$ . Видно, что минимальная мощность оптического излучения, необходимая для инициации оптического пробоя, нелинейно зависит от изменения плотности инициатора, среднее значение  $P_{\min}$  составило  $(267 \pm 5)$  мВт.

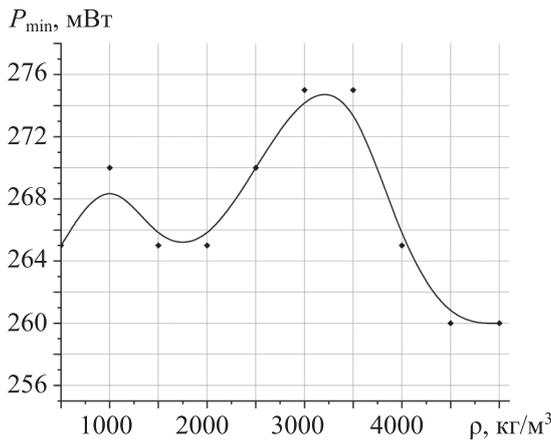


Рис. 8

Таким образом, все выходные параметры математической модели либо не зависят от плотности инициатора, либо зависят незначительно.

*Коэффициент теплоемкости.* На следующем этапе исследования изменялся только коэффициент  $c_p$ , коэффициент теплопроводности  $k$  и плотность инициатора  $\rho$  соответствовали дюралюминию. В табл. 4 представлены результаты расчетов при изменении коэффициента теплоемкости в пределах 860–3700 Дж/(кг·К).

Таблица 4

$c_p$ , Дж/(кг·К)	$t_0$ , мкс	$t_1$ , мкс	$t_2$ , мкс	$P_{\min}$ , мВт	$r_{\max}$ , мкм	$z_{\max}$ , мкм
860	0,16	0,68	24,81	263	13,28	8,83
100	0,17	0,70	23,79	272	13,29	8,84
1200	0,17	0,71	17,36	268	13,31	8,87
1500	0,16	0,71	5,66	266	13,15	8,77
1940	0,17	0,72	3,56	269	13,26	8,90
2380	0,16	0,7	3,36	275	13,29	8,86
2820	0,17	0,72	2,09	271	13,29	8,96
3260	0,17	0,72	0,59	270	13,28	8,83
3700	0,18	0,73	0,31	265	13,29	8,83

Расчеты показали, что время возникновения плазменного очага  $t_0$  в сердцевине волокна, время достижения фронтом плазмообразования границы сердцевина–оболочка  $t_1$ , радиальный  $r_{\max}$  и осевой  $z_{\max}$  размеры области плазмообразования незначительно зависят

от коэффициента теплоемкости. Время возникновения плазменного очага в сердцевине волокна  $t_0$  составило  $(0,17 \pm 0,007)$  мкс, время достижения фронтом плазмообразования границы сердцевины–оболочка  $t_1$  растет до значения теплоемкости 1200 Дж/(кг·К), а затем стабилизируется в интервале  $(0,72 \pm 0,01)$  мкс. Радиальный размер области плазмообразования составил  $(8,85 \pm 0,05)$  мкм, осевой —  $(13,27 \pm 0,05)$  мкм. Данные зависимости здесь не приводятся.

На рис. 9 приведена зависимость времени релаксации  $t_2$  фронта плазмообразования от коэффициента теплоемкости  $c_p$ .

Из рис. 9 видно, что время релаксации фронта плазмообразования нелинейно уменьшается с увеличением коэффициента теплоемкости. Материал инициатора с большим коэффициентом теплоемкости требует меньше тепла для изменения температуры инициатора на 1 К: от этого быстрее прогревается инициатор, а за ним и оптическое волокно, и соответственно время релаксации фронта плазмообразования меньше. При инициации оптического пробоя волокна следует выбирать инициатор, материал которого будет иметь максимальный коэффициент теплоемкости.

На рис. 10 приведена зависимость минимальной мощности оптического излучения, необходимой для инициации оптического пробоя,  $P_{\min}$  от коэффициента теплоемкости  $c_p$ .

Как видно из рис. 10, минимальная мощность оптического излучения, необходимая для инициации оптического пробоя, растет с увеличением коэффициента теплоемкости до 2350 Дж/(кг·К), а после этого снижается. Пороговое значение  $P_{\min}$  составило 275 мВт.

Таким образом, все выходные параметры математической модели, за исключением времени релаксации фронта плазмообразования и минимальной мощности, необходимой для инициации оптического пробоя, не зависят от коэффициента теплоемкости инициатора.

**Заключение.** В работе предложена математическая модель, описывающая стадию возникновения оптического пробоя в одномодовом оптическом волокне при помощи инициатора. В рамках исследования изменялся материал инициатора: дюралюминий, титан, дерево (дуб) и базальт.

Были определены границы температурных фронтов в волокне, соответствующих областям, где возможно возникновение различных фазовых состояний кварцевого стекла, а именно: жидкое, газообразное и плазма. По границам фронта плазмообразования были оценены различные его характеристики: времена эволюции, максимальные размеры в волокне и минимальная мощность, необходимая для инициирования оптического пробоя при различных материалах инициирования.

В результате расчетов получены зависимости различных характеристик фронта плазмообразования в волокне от теплофизических свойств материалов инициатора. Для проведения эксперимента необходимо выбирать материал инициатора с меньшим коэффициентом теплопроводности, большей теплоемкостью с целью быстрого и надежного инициирования оптического пробоя. Влияние плотности инициатора на параметры возникновения пробоя не было подтверждено.

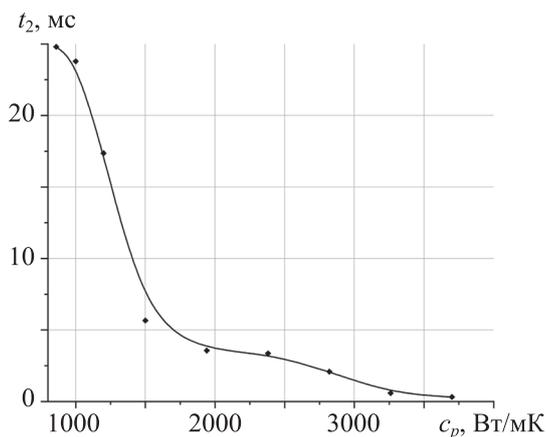


Рис. 9

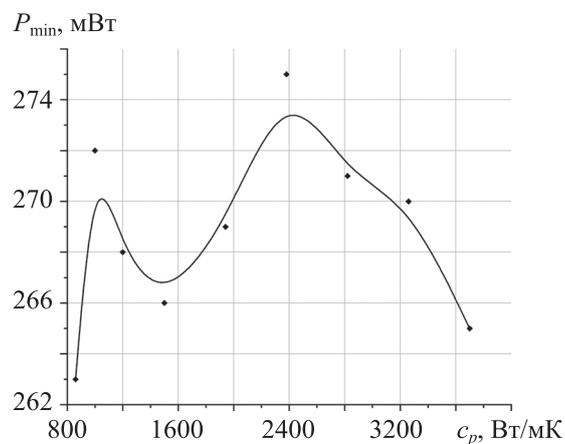


Рис. 10

Результаты настоящей работы могут быть применены для прогнозирования минимальных мощностей вводимого в волокно оптического излучения, необходимых для возникновения оптического пробоя в волокне. Для улучшения прогностических свойств модели и уточнения результатов расчетов необходим более корректный учет теплофизических свойств материала волокна в областях, в которых реализуются различные фазовые состояния вещества.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kashyap R.* Self-propelled self-focusing damage in optical fibers // Proc. X Inter. Conf. on Lasers, Lake Tahoe, USA, 7–11 Dec. 1987. P. 859–866.
2. *Kashyap R., Blow K. J.* Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres // Electron. Lett. 1988. Vol. 24, N 1. P. 47–49. DOI: 10.1049/el:19880032.
3. *Kashyap R., Sayles A. H., Cornwell G. F.* Heat-flow modeling and visualization of catastrophic self-propagating damage in single-mode optical fibres at low powers // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2966. Laser-Induced Damage in Optical Materials. <https://doi.org/10.1117/12.274219>.
4. *Dianov E. M., Bufetov I. A., Frolov A.A.* Destruction of silica fiber cladding by the fuse effect // Optic letters. 2005. Vol. 29, N 16. P. 1852–1854.
5. *Bufetov I. A., Dianov E. M.* Optical discharge in fibre light guides // Adv. of Physical Sciences. 2005. Vol. 175, N 1. P. 100–103.
6. *Shuto Y.* Elements of Fiber Fuse Phenomena. Design Egg, Inc., 2023. 390 p.
7. *Shuto Y., Yanagi S., Asakawa S., Kobayashi M., Nagase R.* Fiber fuse phenomenon in step-index single-mode optical fibers // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2004. Vol. 40, N 8. P. 1113–1121. DOI: 10.1109/JQE.2004.831635.
8. *Facão M.* Traveling Solutions of the Fuse Effect in Optical Fibers // Journal of Lightwave Technology. 2011. Vol. 29, N 1. P. 109–114. DOI:10.1109/Jlt.2010.2094602.
9. *Shuto Y.* Cavity pattern formation and its dynamics of fiber fuse in single-mode optical fibers // J. Informatics Math. Sci. 2020. Vol. 12, N 4. P. 271–288. DOI: 10.26713/jims.v12i4.1459.
10. *Shuto Y.* End face damage and fiber fuse phenomena in single mode fiber optic connectors // Journal of Photonics. 2016. ID 2781392. DOI:10.1155/2016/2781392.
11. *Todoroki S.* Quantitative evaluation of fiber fuse initiation probability in typical single-mode fibers // Optical Fiber Communications Conf. and Exhibition (OFC). Los Angeles, USA, 2015. P. 859–866. DOI: 10.1364/OFC.2015.W2A.33.
12. *Todoroki S.* Quantitative evaluation of fiber fuse initiation with exposure to arc discharge provided by a fusion splicer // Scientific Reports. 2006. Vol. 6. P. 25366. DOI: 10.1038/srep25366.
13. *Todoroki S.* Fiber fuse propagation modes in typical single-mode fibers // Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conf. (OFC/NFOEC). Anaheim, USA, 2013. P. 1–3. DOI: 10.1364/NFOEC.2013.JW2A.11.
14. *Todoroki S.* Modes and threshold power of fiber fuse propagation // IEICE Trans. Commun. 2013. Vol. J96-B, N 3. P. 243–248.
15. *Hanzawa T., Kurokawa K., Tsujikawa K., Mori T., Wada M., Yamamoto F.* Fiber fuse propagation in LP11 mode in few-mode fiber // Optical Fiber Communication Conf. OSA Technical Digest. 2015. Paper W4I.5.
16. *André P. S., Domingues M. F., Antunes P., Alberto N., Frias A. R., Ferreira R. A. S.* Sensors based on recycled optical fibers destroyed by the catastrophic fuse effect // Second International Conf. on Applications of Optics and Photonics. Proc. SPIE. 2014. Vol. 9286. Paper. 92862U. DOI: 10.1117/12.2060191.
17. *Domingues A. P., Paixão T., Mesquita E., Alberto N., Antunes P., Varum H., André P. S.* Hydrostatic pressure sensor based on micro-cavities developed by the catastrophic fuse effect // International Society for Optical Engineering. Proc. SPIE. 2015. Vol. 9634. DOI: /10.1117/12.2195066.
18. *Konin Yu. A., Scherbakova V. A., Bulatov M. I., Malkov N. V., Lucenko A. S., Starikov S. S., Grachev N. A., Perminov A. V., Petrov A. A.* Structural characteristics of internal microcavities produced in optical fiber via the fuse effect // Journal of Optical Technology. 2021. Vol. 88, N 11. P. 672–677. DOI: 10.1364/JOT.88.000672.
19. *Konin Yu. A., Scherbakova V. A., Perminov A. V., Petuhova A. Yu.* Study of micro-cavities formed by optical breakdown under the influence of a magnetic field // Optics Communications. 2022. Vol. 517. P. 128242. DOI: 10.1016/j.optcom.2022.128242.
20. *Старикова В. А., Конин Ю. А., Петухова А. Ю., Перминов А. В.* Математическое моделирование температурных полей при пробое оптического волокна // Вестник Пермского университета. Физика. 2024. № 1. С. 24–32. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2024-1-24-32>.

21. Carslaw H. S., Jaeger J. K. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford Univ. Press, 1959. 517 p.
22. Davis D. D., Mettler S. C., DiGiovanni D. J. Experimental data on the fiber fuse // 27th Annual Boulder Damage Symposium: Laser-Induced Damage in Optical Materials. Proc. SPIE. 1995. Vol. 2714. P. 202–210. DOI: 10.1117/12.240382.
23. Hanafusa H., Hibino Y., Yamamoto F. Formation mechanism of drawing-induced E centers in silica optical fibers // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58, N 3. P. 1356–1361. DOI: 10.1063/1.336107.
24. Самойленко В. В., Фирсов В. В. Температурная устойчивость базальтовых волокон // Construction materials. 2011. № 2. С. 57–58.
25. Артеменко С. Е., Кадыкова Ю. А., Васильева О. Г. Базальтопластики — полимерные композиционные материалы XXI века // Вестн. СГТУ. 2005. № 1(7).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Виктория Александровна Старикова** — аспирант; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра общей физики; мл. науч. сотр.;  
E-mail: scherbakova.vict@mail.ru
- Анатолий Викторович Перминов** — д-р физ.-мат. наук; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра общей физики; зав. кафедрой;  
E-mail: perminov1973@mail.ru

Поступила в редакцию 08.05.24; одобрена после рецензирования 03.06.24; принята к публикации 23.08.24.

#### REFERENCES

1. Kashyap R. *Proc. X Inter. Conf. on Lasers*, Lake Tahoe, USA, Dec. 7–11, 1987, pp. 859–866.
2. Kashyap R., Blow K.J. *Electron. Lett.*, 1988, no. 1(24), pp. 47–49, DOI: 10.1049/el:19880032.
3. Kashyap R., Sayles A.H., Cornwell G.F. *Proc. SPIE*, 1996, vol. 2966, Laser-Induced Damage in Optical Materials, <https://doi.org/10.1117/12.274219>.
4. Dianov E.M., Bufetov I.A., Frolov A.A. *Optic letters*, 2005, no. 16(29), pp. 1852–1854.
5. Bufetov I.A., Dianov E.M. *Adv. of Physical Sciences*, 2005, no. 1(175), pp. 100–103.
6. Shuto Y. *Elements of Fiber Fuse Phenomena*, Design Egg, Inc., 2023, 390 p.
7. Shuto Y., Yanagi S., Asakawa S., Kobayashi M., Nagase R. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, no. 8(40), pp. 1113–1121, DOI: 10.1109/JQE.2004.831635.
8. Facão M. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, no. 1(29), pp. 109–114, DOI:10.1109/Jlt.2010.2094602.
9. Shuto Y. *J. Informatics Math. Sci.*, 2020, no. 4(12), pp. 271–288, DOI: 10.26713/jjms.v12i4.1459.
10. Shuto Y. *Journal of Photonics*, 2016, ID 2781392, DOI:10.1155/2016/2781392.
11. Todoroki S. *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, Los Angeles, USA, 2015, pp. 859–866, DOI: 10.1364/OFC.2015.W2A.33.
12. Todoroki S. *Scientific Reports*, 2006, vol. 6, pp. 25366, DOI: 10.1038/srep25366.
13. Todoroki S. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Anaheim, USA, 2013, pp. 1–3, DOI: 10.1364/NFOEC.2013.JW2A.11.
14. Todoroki S. *IEICE Trans. Commun.*, 2013, no. 3(J96-B), pp. 243–248.
15. Hanzawa T., Kurokawa K., Tsujikawa K., Mori T., Wada M., Yamamoto F. *Optical Fiber Communication Conference*, OSA Technical Digest, 2015, paper W4I.5.
16. André P.S., Domingues M.F., Antunes P., Alberto N., Frias A.R., Ferreira R.A.S. *Second International Conference on Applications of Optics and Photonics*, Proc. SPIE, 2014, vol. 9286, paper 92862U, DOI: 10.1117/12.2060191.
17. Domingues A.P., Paixão T., Mesquita E., Alberto N., Antunes P., Varum H., André P.S. *The International Society for Optical Engineering*, Proc. SPIE, 2015, Vol. 9634, DOI: /10.1117/12.2195066.
18. Konin Yu.A., Scherbakova V.A., Bulatov M.I., Malkov N.V., Lucenko A.S., Starikov S.S., Grachev N.A., Perminov A.V., Petrov A.A. *Journal of Optical Technology*, 2021, no. 11(88), pp. 672–677, DOI: 10.1364/JOT.88.000672.
19. Konin Yu.A., Scherbakova V.A., Perminov A.V., Petuhova A.Yu. *Optics Communications*, 2022, vol. 517, pp. 128242, DOI: 10.1016/j.optcom.2022.128242.
20. Starikova V.A., Konin Yu.A., Petukhova A.Yu., Perminov A.V. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2024, no. 1, pp. 24–32, <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2024-1-24-32>. (in Russ.)
21. Carslaw H.S., Jaeger J.K. *Conduction of Heat in Solids*, Oxford, UK, Oxford Univ. Press, 1959, 517 p.
22. Davis D.D., Mettler S.C., DiGiovanni D.J. *27th Annual Boulder Damage Symposium: Laser-Induced Damage in Optical Materials*, Proc. SPIE, 1995, vol. 2714, pp. 202–210, DOI: 10.1117/12.240382.
23. Hanafusa H., Hibino Y., Yamamoto F. *J. Appl. Phys.*, 1985, no. 3(58), pp. 1356–1361, DOI: 10.1063/1.336107.
24. Samoilenko V.V., Firsov V.V. *Construction materials*, 2011, no. 2, pp. 57–58. (in Russ.)
25. <https://cyberleninka.ru/article/n/bazaltoplastiki-polimernye-kompozitsionnye-materialy-hhi-veka>. (in Russ.)

**DATA ON AUTHORS*****Viktoriya A. Starikova***— Post-Graduate Student; Perm National Research Polytechnic University,  
Department of General Physics; Junior Researcher;  
E-mail: [scherbackova.vict@mail.ru](mailto:scherbackova.vict@mail.ru)***Anatoly V. Perminov***— Dr. Sci.; Perm National Research Polytechnic University, Department of  
General Physics; Head of the Department;  
E-mail: [perminov1973@mail.ru](mailto:perminov1973@mail.ru)

Received 08.05.24; approved after reviewing 03.06.24; accepted for publication 23.08.24.

---

---

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРИБОРОВ

## DESIGN AND PRODUCTION TECHNOLOGY OF INSTRUMENTS

---

---

УДК 62-799; 621.3.084.2; 621.3.087.45  
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-867-877

### РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ЛЕГКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Д. А. Борисов\*, А. А. Жуков

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия*

*\* dimaavia98@mail.com*

**Аннотация.** Предложен подход к построению системы диагностики гибридной силовой установки (ГСУ) легкого летательного аппарата. В качестве диагностируемого объекта рассматривается ГСУ параллельной схемы с использованием двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и электрической силовой установки (ЭСУ). Определены необходимые отслеживаемые параметры работы, отражающие техническое состояние ГСУ. Показана значимость выбранных отслеживаемых параметров ДВС и ЭСУ. Рассмотрено влияние числа оборотов, давления воздуха и топлива, температуры воздуха, топлива, выхлопных газов и головок цилиндров на состояние ДВС, а также параметров ЭСУ — напряжения, тока, температуры аккумулятора и температуры электродвигателя. На основе указанных параметров проведен выбор датчиков с учетом условий их эксплуатации и конструкторских решений прототипа ГСУ. Разработана структурная схема аппаратной части на основе микроконтроллера и внешних аналого-цифровых преобразователей, используемых для оцифровки датчиков температуры. Представлена возможность записи параметров в „черный ящик“, а также передачи информации в бортовую шину данных во время эксплуатации легкого летательного аппарата.

**Ключевые слова:** система диагностики, гибридный двигатель, аппаратная реализация, параметры гибридного двигателя, датчики диагностического комплекса

**Ссылка для цитирования:** Борисов Д. А., Жуков А. А. Разработка системы диагностики гибридной силовой установки легкого летательного аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 867–877. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-867-877.

### DEVELOPMENT OF A DIAGNOSTIC SYSTEM FOR A HYBRID POWER PLANT OF A LIGHT AIRCRAFT

D. A. Borisov\*, A. A. Zhukov

*Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia*

*\* dimaavia98@mail.ru*

**Abstract.** An approach to constructing a diagnostic system for a light aircraft hybrid power plant (HPP) is proposed. A HPP assembled according to a parallel scheme using an internal combustion engine (ICE) and an electric power plant (EPP) is considered as the object being diagnosed. The necessary monitored operating parameters reflecting the technical condition of the HPP are determined. The significance of the selected monitored parameters of the ICE and EPP is shown. The influence of the speed, air and fuel pressure, air, fuel, exhaust gas and cylinder head temperature on the ICE condition, as well as the EPP parameters — voltage, current, battery temperature and electric motor temperature — is considered. Based on the specified parameters, the sensors are selected taking into account their operating conditions and design solutions for the HPP prototype. A structural diagram of the hardware is developed based on a microcontroller and external analog-to-digital converters used to digitize the temperature sensors. The possibility of recording parameters in a “black box” and transmitting information to the on-board data bus during operation of the light aircraft is presented.

**Keywords:** diagnostic system, hybrid engine, hardware implementation, hybrid engine parameters, diagnostic complex sensors

**For citation:** Borisov D. A., Zhukov A. A. Development of a diagnostic system for a hybrid power plant of a light aircraft. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 10. P. 867–877 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-867-877.

**Введение.** Развитие современных технологий энергообеспечения, основанных на использовании систем хранения энергии, эффективных электрических двигателей, компактных и доступных полупроводниковых силовых преобразователей, способствовало созданию наземных транспортных средств с гибридной силовой установкой, которая объединяет в себе традиционный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и электрическую силовую установку (ЭСУ) [1]. Применение гибридных двигателей позволило повысить эффективность расхода топлива, уменьшить вредные выбросы, повысить надежность и снизить уровень шума. Все эти преимущества способствовали бурному развитию гибридных двигателей не только в автомобильной, но и в авиационной промышленности. В отличие от автомобильных, авиационные гибридные силовые установки работают в других режимах [2], которые меняются в зависимости от полетного цикла, что требует создания новых систем управления и диагностики.

Системы диагностики гибридных авиационных двигателей играют важную роль в обеспечении безопасности, надежности и эффективности воздушного транспорта. Они представляют собой набор технических средств и алгоритмов, предназначенных для непрерывного анализа работы гибридных двигателей. Система диагностики позволяет своевременно выявлять неисправности и проблемы в работе двигателей. Во время работы силовой установки ведется непрерывный мониторинг различных параметров, таких как температура, давление, обороты, напряжение и ток, значения которых зависят от режима работы гибридного двигателя.

В настоящей статье представлен подход к построению системы диагностики гибридной силовой установки (ГСУ) легкого летательного аппарата. При этом решались задачи:

- 1) определения необходимых отслеживаемых параметров ГСУ;
- 2) выбора датчиков и преобразователей сигналов с учетом условий эксплуатации в конструкции ГСУ;
- 3) выбора целевого микроконтроллера для получения параметров работы ГСУ от датчиков, записи параметров в „черный ящик“, передачи информации в бортовую шину данных и реализации алгоритма диагностики.

Конфигурация и вид ГСУ зависят от целей использования. В настоящей статье рассматривается система диагностики для опытного образца гибридной силовой установки [2] параллельного типа [3]. Гибридная силовая установка состоит из двух источников крутящего момента — двухтактного, рядного, двухцилиндрового ДВС и синхронного электродвигателя с векторным управлением, которые передают крутящий момент на воздушный винт. Оба источника могут работать независимо друг от друга или совместно — в зависимости от текущего режима полетного цикла.

**Диагностические параметры ДВС.** С целью диагностики двигателя и его составных частей во время полетного цикла отслеживается ряд уникальных параметров, на основании которых система определяет текущее состояние силовой установки. Наиболее важными показателями состояния ДВС и его составных частей служат: температура выхлопных газов, головок цилиндра, впускного воздуха, топлива, давление топлива, давление в дроссельном узле, обороты коленчатого вала. Наиболее важные параметры электрической силовой установки: потребляемый ток, напряжение аккумуляторной батареи, а также температура аккумуляторной батареи, контроллера электродвигателя и самого электродвигателя.

Температура выхлопных газов и головок цилиндра является одним из факторов, определяющих эффективность работы двигателя. Оптимизация температуры двигателя обеспечивает наилучшее сжигание топлива и максимальную производительность. Контроль температуры выхлопных газов и головок цилиндров позволяет оптимизировать параметры работы двигателя и обеспечить его максимальную эффективность. Высокие температуры выхлопных газов и головок цилиндров могут негативно влиять на различные компоненты двигателя [4], такие как клапаны, поршни, головка цилиндра и катализаторы. Постоянное превышение допустимых

температур может привести к износу и повреждению этих деталей. Контроль температуры выхлопных газов и головок цилиндров позволяет обнаружить потенциальные проблемы и предпринять меры для защиты двигателя от повреждений. Аномальные изменения температуры выхлопных газов и головок цилиндров могут указывать на наличие проблем с работой двигателя, таких как неправильное сжигание топлива, нарушение работы системы охлаждения или неисправности в системе выпуска.

Температура воздуха [5, 6] и топлива [7] во впускном коллекторе ДВС может сильно меняться в зависимости от высоты полета летательного аппарата. Температура воздуха влияет на плотность воздушно-топливной смеси, которая поступает в цилиндры двигателя. Температура топлива влияет на его летучесть и способность образовывать однородную смесь с воздухом. Более высокая температура может улучшить распыление топлива и его смешивание с воздухом, что, в свою очередь, может повысить эффективность сгорания и уменьшить количество неполных сгоревших частиц. Более низкая температура впускного коллектора может повысить плотность воздуха, что, в свою очередь, может улучшить эффективность работы двигателя. Это может привести к увеличению мощности и снижению расхода топлива. Температура впускного коллектора также влияет на образование вредных выбросов. Контроль температуры позволяет соблюдать стандарты по выбросам и снижать уровень загрязнения окружающей среды. Мониторинг температуры впускного коллектора позволяет предотвращать подобные проблемы и обеспечивать нормальное функционирование двигателя. Изменения в температуре могут служить индикатором сбоев в работе датчиков, проблем с системой охлаждения или дефектов системы управления двигателем. Мониторинг температуры впускного коллектора помогает выявить и устранить подобные неисправности.

Давление воздуха [8] и топлива [9] в двигателе внутреннего сгорания существенно воздействует на различные аспекты работы двигателя. В процессе полета летательный аппарат может менять высоту полета, вследствие чего заметно изменяется давление воздуха. Более низкое давление во впускном коллекторе приводит к уменьшению плотности воздуха. Это означает, что в каждом цикле впуска в цилиндры поступает меньше кислорода, что может ухудшить сгорание топлива. Это особенно важно в условиях высоких нагрузок или при требовании высокой производительности. Более высокое давление воздуха может способствовать лучшему смешиванию воздуха с топливом, что повышает эффективность сгорания и, следовательно, экономию топлива. Давление топлива влияет на количество топлива, подаваемого в цилиндры за один цикл. Это регулируется системой впрыска и влияет на соотношение воздуха и топлива в смеси. Высокое давление топлива повышает эффективность работы системы смесеобразования. Это важно для обеспечения точного впрыска топлива и предотвращения проблем с неполным сгоранием. В целом, соблюдение расчетных значений давления воздуха и топлива важно для обеспечения оптимальной производительности, эффективности сгорания, экономии топлива и снижения выбросов вредных веществ. Эти параметры тщательно контролируются и регулируются системами управления двигателем.

Число оборотов ДВС отражает общую производительность силовой установки. Изменения в угловой скорости вала двигателя могут свидетельствовать о различных проблемах, таких как неисправности в системах топливоподачи, зажигания, впуска или выпуска. Знание числа оборотов и их отклонений помогает выявить причины неисправностей. Резкое падение или повышение числа оборотов может указывать на износ, сбой в работе или проблемы с механизмами двигателя. Контроль оборотов двигателя помогает поддерживать оптимальные условия его работы, что важно для долговечности и эффективности ДВС.

**Диагностические параметры ЭСУ.** Для анализа состояния работы ЭСУ в ней контролируются параметры тока и напряжения. В гибридных двигателях датчики тока и напряжения играют важную роль в мониторинге и управлении электрической системой. Гибридные двигатели используют батареи для хранения электрической энергии. Датчики тока и напряжения позволяют контролировать процессы зарядки и разрядки батарей. Это позволяет определить состояние заряда батарей и осуществлять управление их работой для обеспечения оптимальной

производительности и долговечности. Датчики тока и напряжения позволяют контролировать работу электрического двигателя и отслеживать потребление энергии. Это важно для эффективного управления энергией и оптимизации работы гибридной системы. Датчики тока и напряжения могут быть использованы для диагностики и обнаружения неисправностей в электрической системе гибридного двигателя. Например, аномальные изменения тока или напряжения могут указывать на проблемы с батареями, электрическими компонентами или проводкой. Мониторинг этих параметров позволяет своевременно обнаружить и устранить неисправности, повышая надежность и безопасность работы системы. Датчики тока и напряжения позволяют системе гибридного двигателя контролировать и оптимизировать энергопотребление. Они помогают регулировать передачу энергии между различными компонентами ГСУ, такими как двигатель внутреннего сгорания, электрический двигатель и батареи. Это позволяет более эффективно использовать энергию и повышать экономичность работы гибридного двигателя.

Известно, что контроль температуры аккумулятора в электромобиле является важным аспектом для обеспечения безопасной и эффективной работы батареи. Оптимальная температура помогает продлить срок службы аккумулятора. Высокие температуры могут ускорить процессы старения, деградации и потери емкости аккумулятора, а также привести к повреждению его структуры и риску возникновения пожара. Низкие температуры, с другой стороны, могут снизить производительность. Контроль температуры позволяет поддерживать аккумулятор в оптимальном состоянии [10], активировав системы охлаждения или приняв соответствующие меры безопасности. Это особенно важно в экстремальных условиях, таких как высокая температура окружающей среды или интенсивная зарядка/разрядка. Контроль температуры также позволяет оптимизировать процессы зарядки и разрядки, обеспечивая безопасность, максимальную эффективность и долговечность.

Анализ температуры электродвигателя важен при взлетном режиме, когда силовая установка работает на максимальной мощности и электродвигатель имеет наихудший КПД, что способствует сильному нагреву обмоток статора и магнитов ротора. При превышении определенного порога температур нарушается прочность лаковой изоляции эмалированного провода обмотки статора, что приводит к межвитковому замыканию и, как следствие — еще большему нагреву. Высокая температура также отрицательно влияет на магниты ротора, которые могут безвозвратно утратить магнитные свойства. Повышение температуры при номинальных параметрах потребляемого тока и числа оборотов может свидетельствовать об износе механической части или работе электродвигателя в перегруженном режиме. Контроль температуры позволяет поддерживать электродвигатель в оптимальном диапазоне, что способствует его надежной и эффективной работе. Оптимальная температура электродвигателя также влияет на энергопотребление системы. Регулирование температуры позволяет эффективно управлять системами охлаждения и обеспечить оптимальное потребление энергии.

**Выбор датчиков системы диагностики.** В соответствии с проанализированными диагностическими параметрами проведен выбор датчиков первичной информации. В табл. 1 приведены используемые датчики и условия их эксплуатации, а на рис. 1 показаны места их установки (на рисунке не указан датчик положения рычага управления двигателем, РУД). Расположение датчиков обусловлено параметрами, которые они измеряют, а также конструктивными и технологическими ограничениями как самих датчиков, так и ГСУ.

*Датчики температуры.* При выборе датчиков температуры выхлопных газов наиболее важными критериями являются диапазон измеряемых температур и возможность измерений в агрессивной среде выхлопной системы. Для датчиков температуры головок цилиндров применяются менее жесткие требования и достаточно соблюдения температурного диапазона.

Для сравнительного анализа помимо основных были выбраны дополнительные критерии: диапазон измеряемых температур; точность; тип выходного сигнала; доступность приобретения; страна-производитель.

На основании критериев была отобрана группа датчиков, представленная в табл. 2.

Таблица 1

Позиция	Датчик	Место установки в ГСУ	Температура эксплуатации, °С	Примечание
1	Датчик температуры головок цилиндров ДВС	Головки 1 и 2 цилиндров	От -30 до +900	Прямой контакт сенсора с огнем; требует внешнего АЦП
2	Датчик температуры выхлопных газов ДВС	Выпускные патрубки 1 и 2 цилиндров	От -30 до +300	Аналоговый, требует внешнего АЦП
3	Датчик температуры электродвигателя	Статор электродвигателя	От -30 до +140	Аналоговый, требует внешнего АЦП
4	Датчик температуры контроллера	Радиатор контроллера	От -30 до +100	Аналоговый, требует внешнего АЦП
5	Датчик температуры аккумуляторной батареи	Аккумуляторная батарея	От -30 до +100	Аналоговый, требует внешнего АЦП
6	Датчик положения коленчатого вала ДВС	Корпус стартера	От -30 до +40	Интегральный, с цифровым входом
7	Датчик оборотов электродвигателя	Статор электродвигателя	От -30 до +140	Цифровой, биполярный
8	Датчик температуры воздуха во впускном коллекторе	Впускной коллектор	От -30 до +40	Аналоговый, требует внешнего АЦП
9	Датчик давления воздуха во впускном коллекторе	Впускной коллектор	От -30 до +40	Аналоговый, требует внешнего АЦП
10	Датчик температуры топлива	Топливная магистраль	От -30 до +40	Аналоговый, требует внешнего АЦП
11	Датчик давления топлива	Топливная магистраль	От -30 до +40	Аналоговый, требует внешнего АЦП
12	Датчик тока	Блок коммутации	От -30 до +40	Аналоговый, требует внешнего АЦП
13	Датчик напряжения	Блок коммутации	От -30 до +40	Аналоговый, требует внешнего АЦП
—	Датчик положения РУД	РУД	От -30 до +40	Интегральный, с цифровым входом

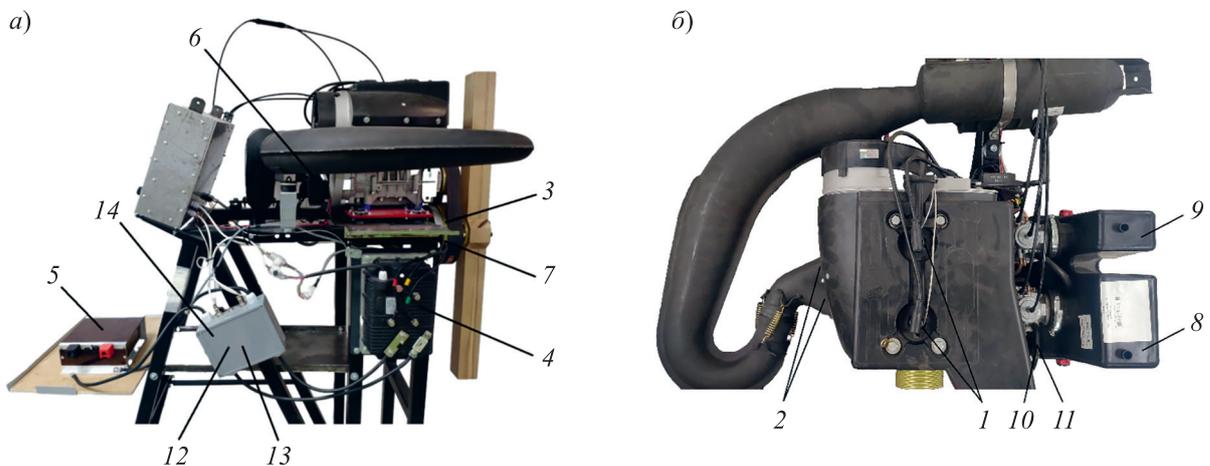


Рис. 1

Таблица 2

Критерий	Датчик			
	РТС [11] и NTC [12] терморезисторы	Термопары [13] (хромель–алюмель)	Платиновые датчики (РТ1000) [14]	Инфракрасные датчики (RAYCMLTV3M)
Диапазон измеряемых температур, °С	От –55 до +300	От 0 до + 300	От –50 до +600	От –20 до +500
Погрешность, °С	±2	±2,8	±0,5	±0,1
Тип входного сигнала	Аналоговый (сопро- тивление)	Аналоговый (напря- жение)	Аналоговый (сопро- тивление)	Аналоговый (напря- жение)
Доступность приобретения	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая
Производители	Отечественные, зарубежные	Отечественные зарубежные	Отечественные, зарубежные	Зарубежные
Преимущества	Простота использова- ния, цена	Высокая точность измерений при вы- соких температурах. Хорошие долговеч- ность и стойкость к воздействию агрес- сивных сред	Высокие точность и стабильность. Широкий диапазон рабочих температур. Меньшее влияние электромагнитных полей, по сравнению с термопарами	Бесконтактные измерения. Широкий диапазон измерения
Недостатки	Влияние электро- магнитных полей. Требуется внешний АЦП	Влияние электро- магнитных полей. Требуются внешние усилители сигнала	Более дорогие, по сравнению с некоторыми другими типами датчиков. Требуются внешние усилители сигнала	Менее точные, требуется калибровка для измеряемой поверхности

По результатам сравнительного анализа наиболее подходящим датчиком выхлопных газов оказался датчик термопары, который обладает большим диапазоном измерений и способен работать в агрессивной среде выхлопной системы; для измерения температуры головок цилиндров рационально использовать платиновые датчики; для измерения температуры впускного воздуха, топлива, электродвигателя, аккумулятора и контроллера целесообразно применить термосопротивление с отрицательным температурным коэффициентом.

*Датчик положения коленчатого вала.* В двигателях внутреннего сгорания с системой электронного впрыска и зажигания для определения положения коленчатого вала используются специализированные датчики, которые работают в совокупности с реперным диском. Точность определения положения коленчатого вала зависит от вычислительных возможностей электронного блока управления двигателем и количества меток на реперном диске (обычно не более шестидесяти).

В зависимости от производителя двигателя широко применяют индуктивный датчик [15], который выдает аналоговый сигнал синусоидальной формы при прохождении зубца реперного диска перед датчиком, или датчик на основе эффекта Холла [15], который выдает цифровой сигнал прямоугольной формы при прохождении зубца реперного диска перед датчиком.

В представленном на рис. 1 опытном образце ГСУ [2] используется не система электронного впрыска, а карбюраторная система смесеобразования. Ввиду этого реперный диск имеет лишь одну метку, которая используется как триггер для катушки зажигания. С помощью одной метки реперного диска можно определить текущее число оборотов коленчатого вала, но невозможно точно вычислить угловое положение вследствие нелинейности вращения коленчатого вала при разных режимах работы.

Таблица 3

Датчик	Выходной сигнал	Тип сигнала	Типовая разрешающая способность	Примечание
Индуктивный датчик	Аналоговый	Инкрементный	До 100 отсчетов, зависит от числа меток на диске	Требуются специализированные АЦП и установка реперного диска
Датчик на основе эффекта Холла	Цифровой	Инкрементный	До 100 отсчетов, зависит от числа меток на диске	Требуется установка реперного диска
Инкрементный энкодер	Цифровой	Инкрементный	До 5000 отсчетов	Требуется соединение с коленчатым валом
Резольвер	Аналоговый	Абсолютный	65 536 отсчетов, зависит от разрядности АЦП	Требуются специализированные АЦП
Интегральный датчик на основе эффекта Холла	Цифровой интерфейс	Абсолютный	16 384 отсчетов, зависит от разрядности АЦП	Требуется соединение с коленчатым валом

В связи с невозможностью определения положения коленчатого вала штатным путем были рассмотрены варианты доработки прототипа ГСУ (в табл. 3 представлены альтернативные варианты датчиков).

Оптимальным является интегральный датчик на основе эффекта Холла. Среди представленных на рынке был выбран датчик AS5047P [16], имеющий цифровой интерфейс SPI (Serial Peripheral Interface) для подключения к микроконтроллеру, он обладает большой разрядностью и может быть установлен на прототип ГСУ.

*Датчики давления.* При рассмотрении датчиков давления топлива в магистрали и давления воздуха во впускном ресивере основным критерием являлась возможность применения датчика в агрессивной среде (бензине). Так, наиболее подходит малогабаритный датчик ПД100 [17]. Он представляет собой преобразователь с современным сенсором структуры „кремний на кремнии“, мембраной из нержавеющей стали, микропроцессорным нормированием и выходным сигналом 4–20 мА. Для измерения давления топлива используется датчик ПД100 с измерением избыточного давления, а для измерения давления во впускном ресивере — датчик абсолютного давления.

*Датчик тока.* Для измерения тока потребления электрической силовой установки необходимо использовать датчик тока, который устанавливается в цепи постоянного тока между аккумулятором и контроллером. Для измерения постоянного тока могут быть использованы два вида измерительных датчиков.

*Датчик тока.* Для измерения тока потребления электрической силовой установки необходимо использовать датчик тока с диапазоном измерения до 300 ампер, которой располагается в цепи постоянного тока между аккумулятором и контроллером. Для измерения постоянного тока могут быть использованы датчики на основе эффекта Холла или токовые шунты: первые уступают по точности измерения, но имеют гальваническую изоляцию, меньше весят и не требуют компенсации температуры.

По результатам сравнения был выбран датчик тока HTFS 200-P [18], который работает на эффекте Холла.

*Датчик напряжения.* Для измерения напряжения аккумуляторной батареи используется датчик на основе резистивного делителя, который преобразует напряжение 0–84 В в напряжение 0–3 В.

*Резервирование измеряемых параметров датчиков.* Большинство параметров работы ГСУ тесно связаны между собой, благодаря чему появляется возможность проверить работоспособность датчиков по параметрам работы других, а также косвенно определять параметры вышедшего из строя датчика. Датчики с взаимосвязанными параметрами представлены в табл. 4.

Таблица 4

Датчик	Датчик температуры головок цилиндров ДВС	Датчик температуры выхлопных газов ДВС	Датчик температуры двигателя	Датчик температуры контроллера	Датчик температуры аккумуляторной батареи	Датчик положения коленчатого вала ДВС	Датчик оборотов двигателя	Датчик температуры воздуха во впускном коллекторе	Датчик давления воздуха во впускном коллекторе	Датчик температуры топлива	Датчик давления топлива	Датчик тока	Датчик напряжения	Датчик положения РУД
Датчик температуры головок цилиндров ДВС	X						X							X
Датчик температуры выхлопных газов ДВС	X					X		X	X					X
Датчик температуры двигателя							X					X	X	X
Датчик температуры контроллера												X	X	X
Датчик температуры аккумуляторной батареи												X	X	X
Датчик положения коленчатого вала ДВС		X					X			X				
Датчик оборотов двигателя	X			X						X		X		X
Датчик температуры воздуха во впускном коллекторе		X							X					
Датчик давления воздуха во впускном коллекторе		X						X						X
Датчик температуры топлива		X												
Датчик давления топлива														
Датчик тока			X	X	X								X	X
Датчик напряжения			X	X	X							X		X
Датчик положения РУД	X		X	X	X		X		X			X	X	

**Разработка аппаратной части системы диагностики.** Задачей аппаратной части является опрос измерительных каналов с датчиков, установленных на гибридной силовой установке, с целью анализа полученных параметров работы. Измеренные значения также записываются в „черный ящик“ и передаются в общую шину данных для последующего использования.

Аппаратная часть располагается в блоке коммутации ГСУ (рис. 1, а, 14). В качестве целевого микроконтроллера используется STM32F446RET6 [19], который обладает аналого-цифровым преобразователем (АЦП), блоком SPI (Serial Peripheral Interface), блоком SDIO (Secure Digital Input Output) и блоком CAN (Controller Area Network) интерфейса.

На рис. 2 представлена разработанная схема аппаратной части системы диагностики.

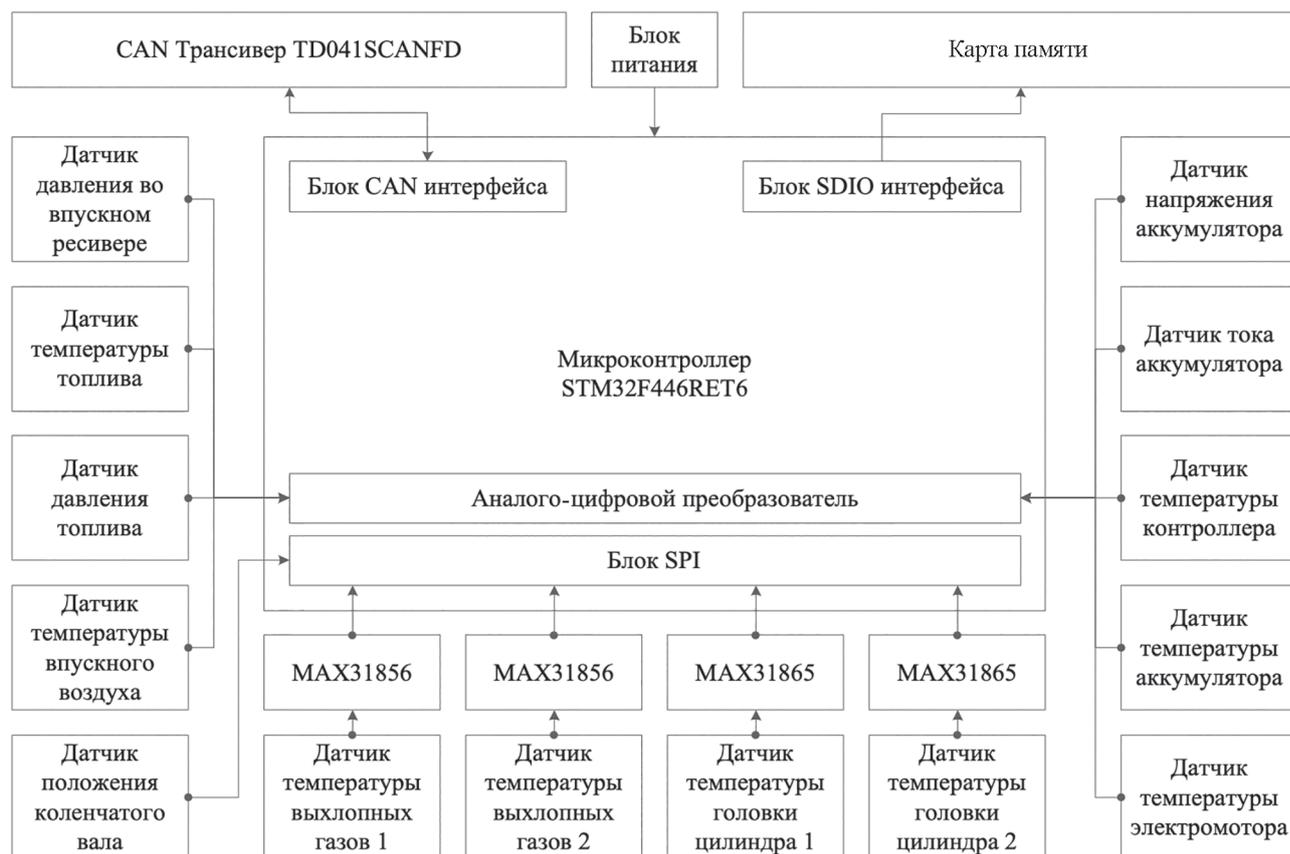


Рис. 2

Аналоговые датчики ГСУ подключаются непосредственно ко входам АЦП микроконтроллера, где происходит преобразование. Ввиду малой разрядности встроенного АЦП микроконтроллера для измерения сигналов с термопар и платиновых датчиков были применены прецизионные аналого-цифровые преобразователи MAX31856 [20] и MAX31865 [21]. Преобразователь MAX31856 с SPI, обладающий функцией компенсации температуры холодного спая, может быть настроен для работы с различными типами термопар. MAX31865 с SPI имеет блок линейаризации и поддерживает работу с платиновыми датчиками PT100 и PT1000. Датчик положения коленчатого вала AS5047P также подключается к блоку SPI микроконтроллера.

Для записи данных в „черный ящик“ используется карта памяти, которая подключается к аппаратному блоку SDIO микроконтроллера.

Для сопряжения аппаратной части системы диагностики с другими устройствами (блоком телеметрии, блоком вывода информации) используется блок CAN шины микроконтроллера, который посредством внешнего трансивера TD041SCANFD передает данные в информационный канал.

**Заключение.** В статье разработана система диагностики гибридной силовой установки легкого летательного аппарата. Рассмотрены отслеживаемые параметры силовой установки,

которые важны для ее использования и диагностики. Проведен сравнительный анализ датчиков с учетом особенностей их размещения и эксплуатации. Разработана схема подключения выбранных датчиков к микроконтроллеру, а также представлены способы хранения и передачи диагностических параметров ГСУ. Использование диагностической системы позволит повысить безопасность использования силовой установки, а также своевременно выявлять потенциальные проблемы при использовании.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычёв А. В., Балясный К. В., Борисов Д. А., Кузнецов К. В. Стенд для тестирования электрической винтомоторной группы // Двигатель. 2021. № 3(135). С. 12–13.
2. Сычёв А. В., Балясный К. В., Борисов Д. А. Гибридная силовая установка с использованием электрического двигателя и двигателя внутреннего сгорания с общим приводом на воздушный винт // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29, № 4. С. 172–185. DOI:10.3479/vt-2022-4-172-185.
3. Варюхин А. Н., Захарченко В. С., Рахманкулов Д. Я., Сунцов П. С., Овдиенко М. А., Гелиев А. В., Киселев И. О., Власов А. В. Традиционные, гибридные и электрические силовые установки самолетов местных воздушных линий // Авиационные двигатели. 2022. № 14. С. 19–32. DOI:10.54349/26586061\_2022\_1\_19.
4. Температуру выхлопных газов — под контроль [Электронный ресурс]: <<https://www.flyrotax.com/ru/dis/aviagammap/temperaturu-vyhlopnih-gazov-pod-kontrol>> (дата обращения: 01.02.2024).
5. Акунов Б. У., Касымбеков К. Дж. Влияние температуры воздуха во впускном коллекторе двигателя на длительность импульса открытия форсунки при эксплуатации автомобиля в различных условиях // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16, № 1(65). С. 32–39.
6. Карнаухов И. В. Определение оптимальной температуры воздуха во впускном коллекторе двигателя // Вестник СибАДИ. 2014. Вып. 3(37). С. 7–12.
7. Охотников Б. Л. Эксплуатация двигателей внутреннего сгорания: учеб. пос. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. С. 42–46.
8. Бабошин А. А., Косарев А. С., Малышев В. С. Оценка технического состояния двигателей внутреннего сгорания по давлению во впускном и впускном коллекторах // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 1. С. 23–32.
9. Как влияет давление в топливной системе на работу двигателя [Электронный ресурс]: <<https://avtika.ru/kak-vliyaet-davlenie-v-toplivnoy-sisteme-na-rabotu-dvigatelya/>> (дата обращения: 01.02.2024).
10. Кулова Т. Л., Скундин А. М. Влияние температур на характеристики литий-ионных и натрий-ионных аккумуляторов // Электрохимия. 2021. Т. 57, № 7. С. 402–407. DOI: 10.31857/S0424857021070082.
11. What is PTC Thermistor: Working & Its Applications [Электронный ресурс]: <<https://www.elprocus.com/ptc-thermistor/>> (дата обращения: 01.02.2024).
12. What is NTC Thermistor: Working & Its Applications [Электронный ресурс]: <<https://www.elprocus.com/ntc-thermistor/>> (дата обращения: 01.02.2024).
13. Подловкин Е. А., Лебедев В. В. Некоторые особенности использования термопар для измерения температуры // Актуальные проблемы энергетики-2016. Минск, 2017. С. 470–474.
14. Сидорцев А., Опарина И. Выбор датчика температуры // Автоматизация и производство. 2023. № 1(53).
15. Датчик положения коленвала: основа работы современного двигателя [Электронный ресурс]: <<https://www.autoopt.ru/articles/products/39478569>> (дата обращения: 01.02.2024).
16. Product Document AS5047P [Электронный ресурс]: <[https://ams.com/documents/20143/36005/AS5047P\\_DS000324\\_3-00.pdf](https://ams.com/documents/20143/36005/AS5047P_DS000324_3-00.pdf)> (дата обращения: 01.02.2024).
17. ПД100 Преобразователь давления измерительный [Электронный ресурс]: <[https://owen.ru/downloads/re\\_pd100.pdf](https://owen.ru/downloads/re_pd100.pdf)> (дата обращения: 01.02.2024).
18. Current Transducer HTFS 200...800-P [Электронный ресурс]: <[https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/htfs\\_200\\_800-p.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/htfs_200_800-p.pdf)> (дата обращения: 01.02.2024).
19. STM32F446RE [Электронный ресурс]: <<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f446re.html#documentation>> (дата обращения: 01.02.2024).
20. MAX31856 Precision Thermocouple to Digital Converter with Linearization [Электронный ресурс]: <<https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/035/948/original/MAX31856.pdf>> (дата обращения: 01.02.2024).
21. MAX31865 RTD-to-Digital Converter [Электронный ресурс]: <<https://www.farnell.com/datasheets/2345101.pdf>> (дата обращения: 01.02.2024).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Дмитрий Алексеевич Борисов**

— аспирант; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), кафедра технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов; E-mail: dimaavia98@mail.ru

**Андрей Александрович Жуков**

— д-р техн. наук, профессор; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), кафедра технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов; профессор; E-mail: and\_zhukov@mail.ru

Поступила в редакцию 02.05.24; одобрена после рецензирования 05.06.24; принята к публикации 23.08.24.

## REFERENCES

1. Sychev A.V., Balyasnyi K.V., Borisov D.A., Kuznetsov K.V. *Engine*, 2021, no. 3(135), pp. 12–13. (in Russ.)
2. Sychev A.V., Balyasnyi K.V., Borisov D.A. *Aerospace MAI Journal*, 2022, no. 4(29), pp. 172–185, DOI:10.3479/vt-2022-4-172-185. (in Russ.)
3. Varyukhin A.N., Zakharchenko V.S., Rakhmankulov D.Ya., Suntsov P.S., Ovdienko M.A., Geliev A.V., Kiselev I.O., Vlasov A.V. *Aviation Engines*, 2022, no. 14, pp. 19–32, DOI:10.54349/26586061\_2022\_1\_19. (in Russ.)
4. <https://www.flyrotax.com/ru/dis/aviagamma/p/temperatura-vyhlopnih-gazov-pod-kontrol>. (in Russ.)
5. Akunov B.U., Kasymbekov K.D. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019, no. 1(16), pp. 32–39, <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-1-32-39>. (in Russ.)
6. Karnaukhov I.V. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2014, no. 3(37), pp. 7–12. (in Russ.)
7. Okhotnikov B.L. *Eksploatatsiya dvigateley vnutrennego sgoraniya* (Operation of Internal Combustion Engines), Ekaterinburg, 2014, pp. 42–46. (in Russ.)
8. Baboshin A.A., Kosarev A.S., Malyshev V.S. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 1(16), pp. 23–32. (in Russ.)
9. <https://avtika.ru/kak-vliyaet-davlenie-v-toplivnoy-sisteme-na-rabotu-dvigatelya/>. (in Russ.)
10. Kulova T.L., Skundin A.M. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2021, no. 7(57), pp. 700–705.
11. *What is PTC Thermistor: Working & Its Applications*, <https://www.elprocus.com/ptc-thermistor/>. (in Russ.)
12. *What is NTC Thermistor: Working & Its Applications*, <https://www.elprocus.com/ntc-thermistor/>. (in Russ.)
13. [https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/35084/Nekotorye\\_osobennosti\\_ispolzovaniya\\_termopar\\_dlya\\_izmereniya\\_temperatury.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/35084/Nekotorye_osobennosti_ispolzovaniya_termopar_dlya_izmereniya_temperatury.pdf?sequence=1&isAllowed=y) C. 470–474. (in Russ.)
14. [https://aip.com.ru/article/vybor\\_datchika\\_temperatury](https://aip.com.ru/article/vybor_datchika_temperatury). (in Russ.)
15. <https://www.autoopt.ru/articles/products/39478569>. (in Russ.)
16. *Product Document AS5047P*, [https://ams.com/documents/20143/36005/AS5047P\\_DS000324\\_3-00.pdf](https://ams.com/documents/20143/36005/AS5047P_DS000324_3-00.pdf).
17. [https://owen.ru/downloads/re\\_pd100.pdf](https://owen.ru/downloads/re_pd100.pdf). (in Russ.)
18. *Current Transducer HTFS 200...800-P*, [https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/htfs\\_200\\_800-p.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/htfs_200_800-p.pdf).
19. *STM32F446RE*, <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f446re.html#documentation>.
20. *MAX31856 Precision Thermocouple to Digital Converter with Linearization*, <https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/035/948/original/MAX31856.pdf>.
21. *MAX31865 RTD-to-Digital Converter*, <https://www.farnell.com/datasheets/2345101.pdf>.

## DATA ON AUTHORS

**Dmitry A. Borisov**

— Post-Graduate Student; Moscow Aviation Institute, Department of Technologies for the Production of Instruments and Information Systems for Aircraft Control; E-mail: dimaavia98@mail.ru

**Andrey A. Zhukov**

— Dr. Sci., Professor; Moscow Aviation Institute, Department of Technologies for the Production of Instruments and Information Systems for Aircraft Control; Professor; E-mail: and\_zhukov@mail.ru

Received 02.05.24; approved after reviewing 05.06.24; accepted for publication 23.08.24.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧАХ****В. М. Медунецкий<sup>1\*</sup>, М. В. Абрамчук<sup>1</sup>, С. Ю. Перепелкина<sup>2</sup>, М. Х. Цветкова<sup>1</sup>, С. Ю. Ловлин<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

\* victor.medunetskiy@itmo.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Проанализированы особенности применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях цилиндрических зубчатых передач. Рассмотрены различные виды композиционных материалов, их свойства, варианты наполнителей и базы данных полимерных композитов. Описаны характеристики ПКМ, используемых в зубчатых звеньях цилиндрических передач, включая зубчатые колеса с несимметричными профилями зубьев, а также оболочковые формообразующие матрицы для изготовления их из ПКМ. Также рассмотрены вопросы обеспечения точности зубчатых передач из ПКМ и предложены методы оценки их уровня качества, включая вероятностный метод расчета точности. Приведены примеры изготовления нестандартных зубчатых передач из полимерных композиционных материалов.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, зубчатые колеса, оболочковые формообразующие матрицы, точность зубчатых передач

**Ссылка для цитирования:** Медунецкий В. М., Абрамчук М. В., Перепелкина С. Ю., Цветкова М. Х., Ловлин С. Ю. Использование полимерных композиционных материалов в цилиндрических зубчатых передачах // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 878–886. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-878-886.

**USE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN SPUR GEAR****V. M. Medunetskiy<sup>1\*</sup>, M. V. Abramchuk<sup>1</sup>, S. Yu. Perepelkina<sup>2</sup>, M. H. Tsvetkova<sup>1</sup>, S. Yu. Lovlin<sup>1</sup>**<sup>1</sup> ITMO University, St. Petersburg, Russia

\* victor.medunetskiy@itmo.ru

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

**Abstract.** The use of polymer composite materials (PCM) in the designs of spur gears is discussed. Various types of composite materials, their properties, options for fillers and databases of polymer composites are analyzed. The characteristics of PCM for gear links of spur gears, including gears with asymmetric profiles, as well as shell forming matrices for their manufacture from PCM, are described. The issues of ensuring the PCM gears precision are also considered and methods for assessing their quality level are proposed, including a probabilistic method for accuracy calculating. Examples of manufacturing non-standard gears from PCM are presented.

**Keywords:** polymer composite materials, gears, shell forming matrices, precision of gears

**For citation:** Medunetskiy V. M., Abramchuk M. V., Perepelkina S. Yu., Tsvetkova M. H., Lovlin S. Yu. Use of polymer composite materials in spur gear. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 10. P. 878–886 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-878-886.

**Введение.** В настоящее время активно расширяется применение конструкционных полимерных материалов при проектировании элементов зубчатых передач в механизмах мехатронных систем широкого спектра назначения. Преимущества и недостатки как отдельных шестерен, так и целых зубчатых механизмов, изготовленных из полимеров или композитных материалов, исследованы весьма широко [1–4]. Снижение потерь на трение, и как следствие — на износ, повышение долговечности и надежности эксплуатации, а также меньшие, в сравнении с металлами и сплавами, вес изделий и их стоимость являются преимуществами передач, изготовленных из ПКМ. Упомянутые аспекты подробно рассмотрены в статьях [5–9].

У зубчатых колес, выполненных из ПКМ, есть определенные преимущества перед шестернями, изготовленными из металлов: более низкие потери на трение, такие шестерни производят меньше шума при работе, обладают меньшей массой, сохраняют свою смазывающую способность и обладают высокой коррозионной стойкостью.

Однако в устройствах, где используются изготовленные из ПКМ передачи, из-за люфтов в сопряжениях зубьев шестерен и упругих деформаций звеньев при реверсе движения возникает мертвый ход. Это обуславливает потребность в существенном сокращении мертвого хода передачи. В некоторых случаях возникает необходимость в повышении нагрузочной способности зубчатых передач из ПКМ.

**Полимерные композиционные материалы. Свойства, приложения, базы данных.** Композиты — многокомпонентные материалы, обычно состоящие из пластичной основы (матрицы), укрепленной наполнителями. Матрица-пластификатор отвечает за монолитность материала, тогда как армирующий наполнитель обеспечивает заданные параметры жесткости, деформации, прочности на излом, кручение и т. д. Соединение различных материалов в объеме композита позволяет получать, по сути, новые материалы с различными физическими и/или химическими свойствами, причем отличными от свойств отдельных компонентов. Изменяя в полимерах пластичную основу и комбинируя наполнители, можно добиваться требуемых характеристик материалов.

Плотность ПКМ (около  $1400 \text{ кг/м}^3$ ) до шести раз меньше, чем у сталей ( $7800 \text{ кг/м}^3$ ) и цветных металлов, например меди ( $8900 \text{ кг/м}^3$ ), как следствие — масса конструкций изделий меньше [10].

Полимерные композиты, в основе которых лежит, например, стекловолокно, обладают отличными диэлектрическими свойствами. Такие ПКМ имеют удельное сопротивление на восемнадцать порядков ниже, чем у углеродистой стали. При этом углепластики обладают токопроводящими свойствами, что также может обеспечить широкое применение.

ПКМ с наполнителями из стекла или базальта не разрушаются в электролитических проводящих средах, что позволяет им не подвергаться коррозии при контакте с почвой или атмосферными осадками. Имеется возможность подобрать полимерные матрицы, которые устойчивы к различным коррозионно-активным средам, включая концентрированные кислоты и щелочи.

Полимерные композиты при своей низкой плотности обладают высокими физико-механическими характеристиками. Например, предел прочности на растяжение у углеродистых сталей составляет 240 МПа, у алюминиевых сплавов — от 50 до 440 МПа, а у полимерных композитов — от 70 (стеклопластик) до 1800 МПа (высокопрочный углепластик) [10].

Армированные пластики при этом несопоставимы по механическим характеристикам с простыми полимерами (поливинилхлорид, полиэтилен и полипропилен).

Коэффициент линейного температурного расширения у полимерных композитов ( $(0,45-8,3) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ) значительно ниже, чем у металлов ( $(11,9-14,2) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ) и простых полимеров (полиэтилен:  $(130-200) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ), что позволяет использовать изделия из ПКМ в широком диапазоне температур.

ПКМ обладают гораздо меньшей, чем у сталей и цветных металлов, теплопроводностью. Использование сэндвич-конструкций позволяет существенно улучшить теплоизоляционные свойства ПКМ. В таких конструкциях различные теплоизолирующие материалы (например, минеральная вата, пенопласт, пенополиуретан) размещаются между слоями ПКМ. Структура „сэндвича“ не только снижает теплопотери, но и придает изделию дополнительную жесткость. Поэтому сэндвич-конструкции из полимерных композитов успешно применяются в различных областях, включая строительство, судостроение, автомобилестроение, авиацию, производство вагонов и локомотивов и др., не только как теплоизоляционные материалы, но и как конструкционные элементы.

Уникальность изделий из полимерных композитов заключается в возможности одновременного создания как материалов, так и изделий. Путем подбора наполнителей, смол и

использования различных методов выкладки или намотки можно производить образцы, соответствующие различным условиям эксплуатации.

Разнообразие состава и свойств полимерных композиционных материалов обусловило появление множества локальных баз данных ПКМ. При этом сложности в формировании материалов и разработке технологий их производства привели к созданию множества программ моделирования на основе математических моделей. Также создаются нормативные документы для помощи в работе при использовании полимерных композиционных материалов, например, ГОСТ Р 56806-2015\*.

Можно перечислить некоторые из обширных баз ПКМ:

- 1) Total Materia (Швейцария) [11];
- 2) Material Data Center (Германия) [12];
- 3) база данных Material Data Center от российской компании ООО „Пластинфо.ру“ [13].

Международная база данных Material Data Center содержит обширнейший комплекс характеристик и свойств ПКМ, а также варианты представления и сравнения подобной информации, однако в них преимущественно отсутствует информация об особенностях обработки композитов различными методами [14].

**Использование полимерных материалов в зубчатых передачах.** Целесообразно рассмотреть характеристики полимеров, из которых можно изготовить композиционные матрицы для дальнейшего применения их в шестернях передач.

Пластмассы PLA и ABS — одни из самых распространенных материалов для производства зубчатых передач. Применение технологий 3D-печати позволяет создавать колеса с необходимыми геометрическими параметрами, при этом значения точностных характеристик готовых изделий не всегда высоки. Самым распространенным недостатком такой технологии является небольшая разрешающая способность, как по горизонтали, так и по вертикали, что приводит к более или менее заметной слоистости поверхности изготовленной модели. Также стоит отметить, что обычные программные решения зачастую не соответствуют требованиям качества, так как образующиеся при трехмерной печати дефекты различного характера коренным образом влияют на конечную точность изделий.

Литье в формовочные матрицы позволяет изготавливать детали любой сложности, включая конусообразные шестерни, и предотвращает появление дефектов на поверхности и пористость. Полученные таким образом детали конструкции могут обладать комбинацией различных физико-механических свойств, таких как жесткость, эластичность, термостойкость, полужесткость, прозрачность.

Для надежной работы изготовленных из ПКМ шестерен необходимо обеспечить максимальное соответствие свойств выбранного материала эксплуатационным требованиям. При высоких нагрузках выбор падает на твердые и жесткие полимерные материалы, включая термoplastы с армированием.

Практика показывает, что изделия из полимеров весьма широко применяются в технике [15]. Среди таких материалов можно выделить фторопласты, в том числе с различными наполнителями, а также полиамиды, например, полиамид-6, широко известный как капролон.

Полиамиды, или пластмассы на основе линейных синтетических высокомолекулярных соединений, содержащих в основной цепи амидные группы, характеризуются высокой эластичностью, прочностью, теплостойкостью, твердостью и износостойкостью. Капролон также обладает высокой прочностью на разрыв, у него низкий коэффициент трения почти со всеми металлами, он обладает свойством быстрой приработки, и до семи раз легче стали и бронзы.

Полипропилен принадлежит к классу полиолефинов. Температура его плавления составляет 160–176 °С, а температурное разрушение начинается при 300 °С. Плотность полипропилена составляет 0,90–0,92 г/см<sup>3</sup>, а усадка порядка 1,3–2,4 %. Основные характеристики

\* ГОСТ Р 56806-2015. Композиты полимерные. Идентификация полимерных композитов в электронных базах данных.

полипропилена включают хорошую износостойкость, устойчивость к кислотам и щелочам, а также к воде, повышенную ударпрочность, устойчивость к изгибающим нагрузкам и использование изделий из этого материала при максимальной рабочей температуре в пределах 120–140 °С [16].

Распространенный полимер фторопласт имеет крайне низкую поверхностную энергию и поэтому может быть использован как антиадгезионный материал. Он обладает стойкостью к старению в обычных условиях и высокими антифрикционными свойствами, исключительно низким коэффициентом трения (при определенных условиях и в зубчатых парах коэффициент трения доходит до 0,02) [17].

Композиции на основе фторопластов широко используются для улучшения свойств изделий путем добавления наполнителей, которые повышают их износостойкость, прочность, твердость или эластичность. В качестве наполнителей для фторопластовых композиций используются материалы, которые могут выдерживать температуру спекания фторопласта: порошковые (минеральные, органические или металлические), волокнистые и каркасные наполнители для армирования. Последние можно разделить по следующим группам:

- сетка из металла, спрофилированная под необходимый объем;
- многократно спрофилированная фольга в заданный объем.

Жесткость композита возрастает, если в качестве наполнителя применяются асбестовая ткань, кремнеземы, металлическая вата. При этом относительная деформация материала будет снижаться при малых значениях коэффициента трения [18].

Высокоточная обработка изделия из ПКМ обеспечивает длительный срок службы без необходимости смазки, что особенно важно в полупроводниковой, пищевой, упаковочной, а также медицинской промышленности.

Благодаря низким потерям при трении зубчатые колеса из ПКМ, в сравнении с обычными шестернями из металла, характеризуются пониженным шумом, а также высоким коэффициентом полезного действия. Точность изготовления и прочность передачи определяют выбор размеров зубчатого колеса, надежность сопряжений и расположение усиливающих элементов детали. Шестерни из ПКМ могут быть целиком изготовлены из полимерных материалов или армированы [19].

**Полимерные композиционные материалы в зубчатых колесах с нестандартной формой профиля зубчатого венца.** Чтобы увеличить как нагрузочную способность передачи, так и срок эксплуатации, предлагается конструкцию зубьев передачи изготавливать с ассиметричным профилем венца у зубьев шестерен. Подобное решение целесообразно использовать в случае разницы крутящих моментов при реверсе движения зубчатой передачи [20]. Такой подход продемонстрирован на рис. 1, где показаны зубцы эвольвентного колеса с несимметричной формой профиля, которые образуются от двух основных окружностей диаметром  $d_{ba}$  и  $d_{bb}$  ( $d_a$  — диаметр внешней окружности по вершинам зубьев,  $d_f$  — диаметр наружной окружности по вершинам зубьев венца,  $d$  — делительный диаметр).

Практика показывает, что создавать высококачественные поверхности венцов зубьев возможно из композиционных термопластичных материалов посредством литья в оболочковые формообразующие матрицы [21, 22], а наполнять матрицы — из реактопластов (термореактивных материалов), например, из полимеров на основе эпоксидной и фенолформальдегидной смолы. Физико-механические свойства термореактивных материалов остаются стабильными при изменении условий окружающей среды. Благодаря прочности, электроизоляционным свойствам и способности работать при высоких температурах фенопласты широко применяются в конструктивных, фрикционных и антифрикционных элементах приборов и узлов машин [23].

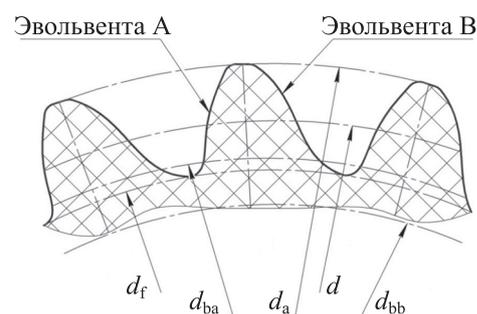


Рис. 1

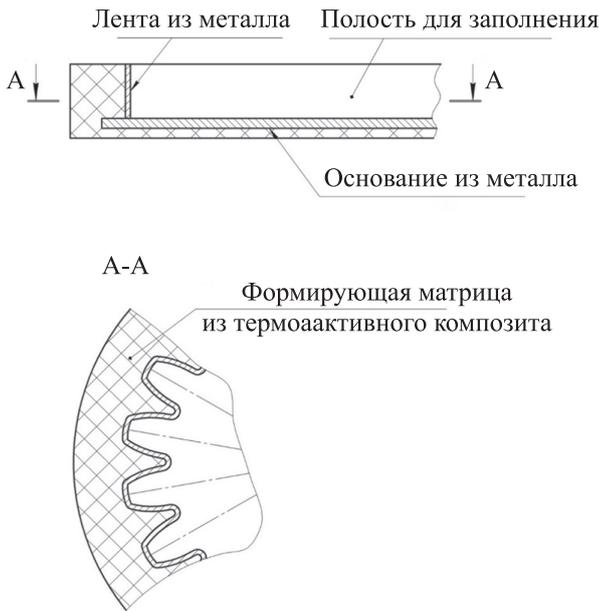


Рис. 2

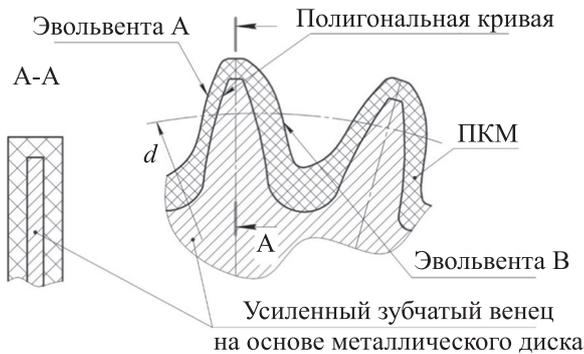


Рис. 3

Поверхности внутренних элементов, формирующие полость, представляют собой металлическую оболочку. Это возможно выполнить, если применяется изогнутый по контуру мастер-модели зубчатый венец шестерни. Для подобного варианта следует применять холоднокатаную ленту из низкоуглеродистой стали, которая зачастую используется при гибке деталей. Стоит отметить, что на внутренней (прилегающей к заготовке) стороне металлической ленты необходимо создать микрорельеф с заданными функциональными параметрами, при этом на другой стороне поверхности — с достаточной шероховатостью для прочного соединения с материалом формообразующей матрицы. Повышение значений шероховатости приводит к повышению адгезионной и когезионной прочности.

В настоящее время мастер-модель формирования корпуса целесообразно изготавливать на 3D-принтере. Такая конструкция формирующей матрицы представлена на рис. 2.

Следует отметить, что для повышения изгибной прочности зубьев предлагается использовать шестерни с усиленными (армированными) дисками, у которых венцы усилены металлом. На рис. 3 зубья венца выполнены из композитного материала, при этом профиль зубьев является несимметричным, а армирующий металлический зубчатый венец выполнен симметричным.

### Оценка точности нестандартных передач из ПКМ.

Поскольку изделиям, выполненным из ПКМ, свойственны усадка и коробление (неравномерная усадка), среди качественных показателей оценки зубчатых передач будем рассматривать точность. Для передач зацеплением, к которым относятся зубчатые передачи различных видов, точность является основным показателем качества в связи с ограниченной номенклатурой применяемых при их изготовлении материалов.

В Российской Федерации по ГОСТ 1643-81, для передач с модулем зуба  $m \geq 1$  мм, нормируют двенадцать степеней точности, устанавливают шесть видов сопряжений: А, В, С, D, E, H и восемь видов допуска  $T_{jn}$  на зазор: x, y, z, a, b, c, d, h. Точность изготовления зубчатой передачи устанавливают с помощью степени точности, а требования к зазору — видом сопряжения по нормам зазора.

Для цилиндрических зубчатых передач, преимущественно эвольвентных, с учетом погрешностей монтажа предельные значения кинематической погрешности передачи  $F'_{i0}$  рассчитываются по следующим формулам:

$$F'_{i0\min} = 0,62K_s(F'_{i1} + F'_{i2}), \quad (1)$$

$$F'_{i0\min} = 0,71K_s(F'_{i1} + F'_{i2}), \quad (2)$$

$$F'_{i0\max} = K \left[ \sqrt{(F'_{i1})^2 + E_{\Sigma M_1}^2} + \sqrt{(F'_{i2})^2 + E_{\Sigma M_2}^2} \right], \quad (3)$$

где индексы „1“ и „2“ относятся к соответственно ведущему и ведомому зубчатым колесам;  $K$ ,  $K_s$  — коэффициенты фазовой компенсации, которые учитывают степень изменения кинематиче-

ской погрешности от начального положения звеньев;  $F_i^l$  — кинематическая погрешность зубчатого колеса;  $E_{\Sigma M}$  — суммарная приведенная погрешность монтажа (согласно ГОСТ 21098-82).

Выражение (1) применяется для колес со степенями точности 3–6, (2) — для колес со степенями точности 7 и 8, (3) — для всех степеней точности.

Кинематическая погрешность колеса определяется согласно ГОСТ 1643-81 как сумма допусков на накопленную погрешность шага ( $F_p$ ) и погрешность профиля зуба ( $f_f$ ).

Минимальные и максимальные величины кинематического мертвого хода передачи составляют:

$$j_{tmin} = \frac{j_{min}}{\cos\alpha\cos\beta},$$

$$j_{tmax} = 0,7(E_{Hs1} + E_{Hs2}) + \sqrt{0,5(T_{H1}^2 + T_{H2}^2 + 2f_a^2 + G_{r1}^2 + G_{r2}^2)},$$

где  $j_{min}$  — гарантированный боковой зазор (нормальный);  $\alpha$  — угол исходного профиля;  $\beta$  — делительный угол наклона линии зуба;  $E_{Hs}$  — наименьшее дополнительное смещение исходного контура;  $T_H$  — допуск на смещение исходного контура;  $\pm f_a$  — предельные отклонения межосевого расстояния;  $G_r$  — радиальный зазор в опорах (по ГОСТ 20198-82).

Величина  $E_{\Sigma M}$  для зубчатых колес вычисляется по следующему выражению:

$$E_{\Sigma M} = \sqrt{\left(\frac{e_r \operatorname{tg}\beta}{\cos\beta}\right)^2 + (e_a \operatorname{tg}\beta)^2},$$

где  $e_r$  и  $e_a$  — монтажные радиальное и осевое биения зубчатого колеса соответственно (показатели точности монтажа зубчатых колес), их расчет описан в ГОСТ 21098-82.

Предполагается, что  $G_r = e_r$ . Обе величины,  $e_r$  и  $e_a$ , связаны с вариантом соединения зубчатого колеса с валом.

Значение  $e_r$  рассчитывается по формуле:

$$e_r = \left( F_r + e_{\Pi} + e_{\text{в}} + K_{i\alpha} \frac{a+b}{l} \right),$$

где  $F_r$  — допуск на радиальное биение зубчатого венца шестерни, его значение находится по ГОСТ 1643-81;  $e_{\Pi}$  — зазор в посадке колеса на вал, зависящий от конструкции соединения и используемой посадки;  $e_{\text{в}}$  — допуск на радиальное биение посадочной ступени вала под шестерню относительно цапфы вала (у гладких валов  $e_{\text{в}} = 0$ ), определяется согласно ГОСТ 24643-81;  $K_{i\alpha}$  — радиальное биение внутреннего кольца шарикоподшипника, величина  $K_{i\alpha}$  принимается согласно ГОСТ 520-2011.

Значения  $a$ ,  $b$  и  $l$  определяются согласно рис. 4, на котором представлены вариации расположения шестерни на валу передачи. Для передач, у которых угол наклона зубьев  $\beta = 0$ ,  $e_a = 0$ .

Помимо вышеописанного для точностных расчетов можно применять, например, метод моделирования случайных чисел (метод Монте-Карло), при котором составляющие показателей точности будут случайными величинами из определенных интервалов значений [24, 25].

**Заключение.** Таким образом, в настоящей работе предложены различные примеры нестандартных зубчатых передач, выполненных из ПКМ, в частности, зубчатые колеса с несимметричным армированием зубьев, а также рассмотрены особенности их изготовления. Проанализированы виды композиционных материалов и их характеристики, обеспечивающие

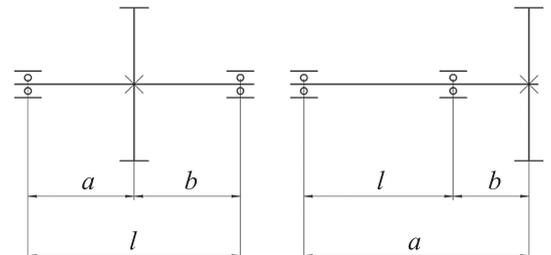


Рис. 4

возможность использования в зубчатых звеньях цилиндрических передач, а также оболочковые формообразующие матрицы для их изготовления из ПКМ. Рассмотрены основные вопросы обеспечения точности зубчатых передач из ПКМ и математические зависимости для оценки их уровня качества.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ghosh R., Ghosh S., Srivastava T., Barman R. N. Design and Manufacturing of Laminated Spring: A New Approach Based On Composites // Intern. Journ. of Engineering and Technology. 2017. Vol. 9, N 2. P. 438–451. DOI: 10.21817/ijet/2017/v9i2/170902285.
2. Chatterjee S., Gupta K. A comparative analysis on two gear tooth materials for low speed and high torque transmission // Advances in Modelling and Analysis C. 2018. Vol. 73, N 3. P. 79–83. DOI: 10.18280/ama\_c.730301.
3. Pawar P. B., Abhay A. U. Analysis of Composite Material Spur Gear under Static Loading Condition // Materials Today: Proc. 2015. Vol. 2, N 4-5. P. 2968–2974. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.278.
4. Thirugnanam A., Sathish J., Rakesh L. Contact analysis of spur gear using composite material (NYLO CAST) // Middle-East Journal of Scientific Research. 2014. N 20(8). P. 966–968. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2014.20.08.114144.
5. Mao K., Greenwood D., Ramakrishnan R., Goodship V., Shroufi C., Chetwynd D., Langlois P. The wear resistance improvement of fibre reinforced polymer composite gears // Wear. 2019. N 426. P. 1033–1039. DOI: 10.1016/j.wear.2018.12.043.
6. Catera P. G., Mundo D., Gagliardi F., Treviso A. A comparative analysis of adhesive bonding and interference fitting as joining technologies for hybrid metal-composite gear manufacturing // Intern. Journ. on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2020. P. 1–16. DOI: 10.1007/s12008-020-00647-y.
7. Catera P. G., Mundo D., Treviso A., Gagliardi F., Visrolia A. On the design and simulation of hybrid metal-composite gears // Applied Composite Materials. 2019. N 26(3). P. 817–833. DOI: 10.1007/s10443-018-9753-6.
8. Gauntt S. M., Campbell R. L. Characterization of a Hybrid (Steel-Composite) Gear with Various Composite Materials and Layups // AIAA Scitech 2019 Forum. 2019. P. 0146. DOI: 10.2514/6.2019-0146.
9. Singh A. K., Yadav S., Singh P. K. A Comparative Study for Transmission Efficiency of ABS, POM, and HDPE Spur Gears // Advances in Engineering Design. 2019. P. 269–277. DOI: 10.1007/978-981-13-6469-3\_24.
10. Что такое полимерный композиционный материал [Электронный ресурс]: <<https://vec-v.ru/chto-takoe-polimernyy-kompozit>>.
11. Total Materia. The most extensive database of materials in the world [Электронный ресурс]: <<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=Home&LN=RU>>.
12. Material Data Center. Data on materials and their applications [Электронный ресурс]: <<https://www.materialdatacenter.com/mb>>.
13. База полимерных материалов [Электронный ресурс]: <<https://plastinfo.ru/polyglobe>>.
14. Кряжев Ю. А., Андреев М. В., Шутюк А. А. Формирование базы данных полимерных композитов // Инновации в машиностроении: сб. тр. IX Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 491–497.
15. González-Henríquez C. M., Sarabia-Vallejos M. A., Rodríguez-Hernández J. Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications // Progress in Polymer Science. 2019. Vol. 94. P. 57–116. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2019.03.001.
16. Goh G. D., Yap Y. L., Tan H. K. J., Sing S. L., Goh G. L., & Yeong W. Y. Process–structure–properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2020. N 45(2). P. 113–133. DOI: 10.1080/10408436.2018.1549977.
17. Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components / Ed. by K. Friedrich, R. Walter. Woodhead Publishing, 2020. 458 p. DOI: 10.1016/C2018-0-03664-6.
18. Directory of polymers. Polymer materials: products, equipment, technologies [Электронный ресурс]: <<http://www.polymerbranch.com/catalogp.html>>.
19. Karapetyan A. N., Scharr G. The choice of polymeric materials in the design of gear wheels // Proc. of the NAS RA and SEUA: Technical Sciences. 2007. N 60(2). P. 266–271.
20. Старжинский В. Е., Шалобаев Е. В., Шилько С. В. Элементы привода приборов: расчет, конструирование, технологии. Минск: Белорусская наука, 2012. 769 с.
21. Старжинский В. Е., Шалобаев Е. В., Шилько С. В. Технология производства зубчатых колес из термопластичных полимерных материалов (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2018. Т. 4, № 2. С. 6–31.
22. Старжинский В. Е., Шалобаев Е. В. Проектирование прессформ для точных пластмассовых колес с использованием технологии быстрого прототипирования // Прогрессивные технологии в машиностроении и приборостроении. 2005. С. 28–29.

23. Виткалова И. А., Торлова А. С., Пикалов Е. С. Технологии получения и свойства фенолформальдегидных смол и композиций на их основе // Науч. обзор. Техн. науки. 2017. № 2. С. 15–28.
24. Абрамчук М. В. Совершенствование расчетов параметров точности зубчатых колес, зубчатых передач и многозвенных зубчатых механизмов: Дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2014. 183 с.
25. Абрамчук М. В. Расчет параметров точности эвольвентных цилиндрических зубчатых передач // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 2. С. 118–122.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; профессор; E-mail: victor.medunetskiy@itmo.ru
- Михаил Владимирович Абрамчук** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: abramchukmv@itmo.ru
- Светлана Юрьевна Перепелкина** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа автоматизации и робототехники; доцент; E-mail: Svetlana.yu.perpelkina@gmail.com
- Мадина Хасановна Цветкова** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: madinatcvetkova@itmo.ru
- Сергей Юрьевич Ловлин** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: seri-l@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.04.24; одобрена после рецензирования 30.04.24; принята к публикации 23.08.24.

#### REFERENCES

1. Ghosh R., Ghosh S., Srivastava T., Barman R.N. *International Journal of Engineering and Technology*, 2017, no. 2(9), pp. 438–451, DOI: 10.21817/ijet/2017/v9i2/170902285.
2. Chatterjee S., Gupta K. *Advances in Modelling and Analysis C*, 2018, no. 3(73), pp. 79–83, DOI: 10.18280/ama\_c.730301.
3. Pawar P.B., Abhay A.U. *Materials Today*, 2015, no. 4-5(2), pp. 2968–2974, DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.278.
4. Thirugnanam A., Sathish J., Rakesh L. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 2014, no. 20(8), pp. 966–968, DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2014.20.08.114144.
5. Mao K., Greenwood D., Ramakrishnan R., Goodship V., Shrouti C., Chetwynd D., Langlois P. *Wear*, 2019, no. 426, pp. 1033–1039, DOI: 10.1016/j.wear.2018.12.043.
6. Catera P.G., Mundo D., Gagliardi F., Treviso A. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2020, pp. 1–16, DOI: 10.1007/s12008-020-00647-y.
7. Catera P.G., Mundo D., Treviso A., Gagliardi F., Visrolia A. *Applied Composite Materials*, 2019, no. 26(3), pp. 817–833, DOI: 10.1007/s10443-018-9753-6.
8. Gauntt S.M., Campbell R.L. *AIAA Scitech 2019 Forum*, 2019, pp. 0146, DOI: 10.2514/6.2019-0146.
9. Singh A.K., Yadav S., Singh P.K. *Advances in Engineering Design*, 2019, pp. 269–277, DOI: 10.1007/978-981-13-6469-3\_24.
10. <https://vec-v.ru/cto-takoe-polimernyy-kompozit>. (in Russ.)
11. *Total Materia*, <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=Home&LN=RU>.
12. *Material Data Center*, <https://www.materialdatacenter.com/mb>.
13. <https://plastinfo.ru/polyglobe>. (in Russ.)
14. Kryazhev Yu.A., Andreev M.V., Shityuk A.A. *Innovatsii v mashinostroyenii* (Innovations in Mechanical Engineering), Collection of works of the IX Intern. Scientific and Practical Conf., 2018, pp. 491–497. (in Russ.)
15. González-Henríquez C.M., Sarabia-Vallejos M.A., Rodríguez-Hernández J. *Progress in Polymer Science*, 2019, vol. 94, pp. 57–116, DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2019.03.001.
16. Goh G.D., Yap Y.L., Tan H.K.J., Sing S.L., Goh G.L., & Yeong W.Y. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2020, no. 45(2), pp. 113–133, DOI: 10.1080/10408436.2018.1549977.
17. Friedrich K., Walter R., eds., *Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components*, Woodhead Publishing, 2020, 458 p., DOI: 10.1016/C2018-0-03664-6.
18. *Directory of polymers*, <http://www.polymerbranch.com/catalogp.html>.
19. Karapetyan A.N., Scharr G. *Proceedings of the NAS RA and SEUA: Technical Sciences*, 2007, no. 2(60), pp. 266–271.
20. Starzhinsky V.E., Shalobaev E.V., Shilko S.V. *Elementy privoda priborov: raschet, konstruirovaniye, tekhnologii* (Elements of Device Drives: Calculation, Design, Technologies), Minsk, 2012, 769 p. (in Russ.)
21. Starzhinsky V.E., Shil'ko S.V., Shalobaev E.V. *Polimernyye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 2(4), pp. 6–31. (in Russ.)
22. Starzhinsky V.E., Shalobaev E.V. *Progressivnyye tekhnologii v mashinostroyenii priborostroyenii* (Progressive Technologies in Mechanical Engineering and Instrument Making), 2005, pp. 28–29. (in Russ.)
23. Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov E.S. *Nauchnoye obozreniye. Tekhnicheskiye nauki*, 2017, no. 2, pp. 15–28. (in Russ.)

24. Abramchuk M.V. *Sovershenstvovanie raschetov parametrov tochnosti zubchatykh koles, zubchatykh peredach i mnogozvennykh zubchatykh mekhanizmov* (Improvement of Calculations of Precision Gears, Gears and Gear Multi-Link Mechanisms), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2014, 183 p. (in Russ.)
25. Abramchuk M.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 2(61), pp. 118–122. (in Russ.)

**DATA ON AUTHORS**

- Victor M. Medunetsky** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Professor; E-mail: victor.medunetskiy@itmo.ru
- Mikhail V. Abramchuk** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: abramchukmv@itmo.ru
- Svetlana Yu. Perepelkina** — PhD; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Graduate School of Automation and Robotics; Associate Professor; E-mail: Svetlana.yu.perepelkina@gmail.com
- Madina H. Tsvetkova** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: madinatcvetkova@itmo.ru
- Sergei Yu. Lovlin** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: seri-l@yandex.ru

Received 21.04.24; approved after reviewing 30.04.24; accepted for publication 23.08.24.

**БЕСЦЕНТРОВАЯ СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯМИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБОЛОЧЕК  
В ПРОЦЕССЕ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ****А. Н. Шилин\*, А. А. Шилин, Р. Г. Атаманюк***Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**\* shanvstu@gmail.com*

**Аннотация.** Проанализирована оптическая система контроля отклонений поверхности крупногабаритных оболочек (а именно обечаек) от цилиндрической формы в процессе их формообразования на валковых листогибочных машинах. Требуемая форма детали обеспечивается правильным подбором технологического процесса на такой машине. Точность размеров обечайки достигается при соответствующей точности разметки и раскроя заготовки. Разработан оптико-электронный измерительный прибор, регистрирующий положение касательного луча к поперечному сечению обечайки, предназначенный для контроля размеров обечайки в процессе ее изготовления. Этот прибор имеет сравнительно простую оптическую схему измерения. Основной проблемой контроля формы поперечного сечения обечайки с помощью этого прибора является непостоянство положения центра сечения при вращении обечайки в валках машины. С целью преодоления этой проблемы сформирована математическая модель процесса измерения для такого прибора, а также выполнен анализ погрешностей.

**Ключевые слова:** контроль крупногабаритных деталей, оптические схемы измерения, оптические и оптико-электронные приборы, бесцентровые методы контроля цилиндрических деталей

**Ссылка для цитирования:** Шилин А. Н., Шилин А. А., Атаманюк Р. Г. Бесцентровая схема управления профилями крупногабаритных оболочек в процессе их формирования // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 887–892. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-887-892.

**CENTERLESS CONTROL SCHEME FOR LARGE-SIZED SHELL PROFILES DURING THEIR FORMATION****A. N. Shilin\*, A. A. Shilin, R. G. Atamanyuk***Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**\* shanvstu@gmail.com*

**Abstract.** An optical system for monitoring the deviations of the surface of large-sized shells from the cylindrical shape during their shaping on roll sheet bending machines is analyzed. The required shape of the part is ensured by the correct selection of the technological process on such a machine. The accuracy of the shell dimensions is achieved with the appropriate accuracy of marking and cutting the workpiece. An optical-electronic measuring device is developed that records the position of the tangent beam to the cross-section of the shell, designed to control the shell dimensions during its manufacture. This device has a relatively simple optical measurement scheme. The main problem of monitoring the cross-sectional shape of the shell using this device is the inconstancy of the position of the center of the section when the shell rotates in the machine rolls. In order to overcome this problem, a mathematical model of the measurement process for such a device is created, and an error analysis is performed.

**Keywords:** control of large-sized parts, optical measurement schemes, optical and optoelectronic devices, centerless methods of control of cylindrical parts

**For citation:** Shilin A. N., Shilin A. A., Atamanyuk R. G. Centerless control scheme for large-sized shell profiles during their formation. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 10. P. 887–892 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-887-892.

**Введение.** Обечайка представляет собой основной элемент конструкций, используемых, например, в аэрокосмической, нефтехимической и энергетической отраслях. Она производится из листового материала на специализированном оборудовании для гибки металла. Точность среднего диаметра обечайки определяется точностью разметки и раскроя листовой заготовки. Технологическая точность формирования цилиндрической поверхности обечайки на листогибочной машине напрямую влияет на эффективность сборочных и монтажных операций, а также

на эксплуатационные характеристики конечного изделия. Критически важным этапом в этом технологическом процессе является формирование цилиндрической формы заготовки при ее вращении в валках листогибочной машины.

Для контроля размеров деталей были разработаны измерительные приборы на основе углового бесцентрового метода измерения [1, 2]. Эти приборы позволяют отслеживать размеры деталей с использованием простой (по сравнению с методами, включающими автоматический поиск базовой оси детали) в технической реализации методики. При этом основную сложность при контроле формы поперечного сечения обечайки с помощью этих приборов представляет непостоянство положения центра сечения при вращении обечайки в валках машины. К преимуществам углового бесцентрового метода контроля размеров и формы поперечного сечения обечайки относятся сравнительно простая техническая реализация и возможность контроля формы продольного сечения обечайки (конусности, бочкообразности и вогнутости) за счет перемещения преобразователя по длине детали. Недостаток этого метода — погрешность регистрации формы поперечного сечения. Поэтому для бесцентральной схемы управления технологическим процессом необходимо сформировать математическую модель процесса измерения и выполнить анализ погрешностей.

На начальном этапе проектирования оптико-электронных приборов по условию минимальной методической погрешности выбирается оптическая схема измерения. Затем по этой схеме определяется выражение, связывающее координату точки контроля поверхности с угловым смещением касательной.

Разработанный прибор функционирует следующим образом (рис. 1; 1 — обечайка, 2 — валки, 3 — блок измерительных преобразователей, 4 — сервопривод, 5 — стойки, 6 — пульт управления). Перед измерением блок преобразователей, состоящий из цифровой камеры и пирометра, с помощью сервопривода устанавливается в угловое положение, соответствующее номинальному размеру обечайки. Камера регистрирует угловое отклонение проекции границы детали от оптической оси камеры  $\psi$  (рис. 2). Пирометр регистрирует температуру детали, необходимую для введения температурной поправки на размер детали при ее остывании и для определения момента окончания технологического процесса формообразования.

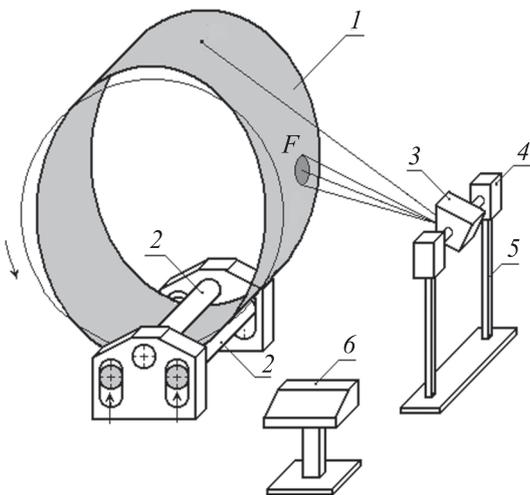


Рис. 1

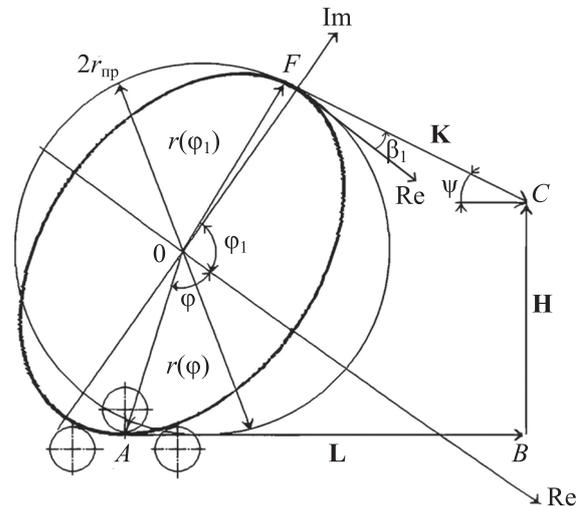


Рис. 2

**Моделирование геометрических преобразований в оптических схемах.** Для решения подобных задач моделирования в основном используются тригонометрический аппарат и аналитическая геометрия [3]. Их недостатком является отсутствие полной формализации всех операций, критически важной при компьютерных вычислениях. Так, при нахождении расстояния между двумя точками на координатной плоскости возникают трудности в определении знака перед радикалом формулы, поэтому, если при моделировании геометрических

преобразований используется вся координатная плоскость, для каждого квадранта составляется свое уравнение (всего требуется четыре уравнения). Причем предварительно определяются знаки в уравнениях — операция более трудоемкая и менее формализуемая, чем составление самих уравнений [4]. Для решения этих задач разработан метод, основанный на использовании комплексных чисел и их геометрическом представлении в виде векторов на комплексной плоскости. Простые алгебраические операции позволяют производить основные геометрические преобразования в оптических системах [5]. Алгебраическая формализация дает возможность использовать компьютерные программы.

**Анализ бесцентровой схемы контроля профилей оболочек вращения.** Информация о требуемой геометрической форме детали служит основой для выбора технологического процесса ее формирования. Однако в связи с бесцентровым характером вращения детали обеспечить регистрацию ее формы в поперечном сечении (профилограммы) затруднительно. Эта проблема описана в работах по контрольно-измерительной технике [6–8]. Однако до настоящего времени возможности использования этих методов анализа профилей были ограничены случаями преобладания гармонических компонентов профиля детали.

Определение профилограммы со сложной формой поперечного сечения — нетривиальная задача и ее решение пока не найдено. Основными причинами трудности регистрации профилограммы сложной формы являются перемещение центра обечайки при ее вращении в валках машины, неравномерность скорости вращения и то, что оптико-электронный преобразователь можно описать с помощью кинематической схемы плоского качающегося измерительного рычага. Необходимо отметить: в настоящее время технологический процесс правки обечаек осуществляется за счет установки радиусагиба с помощью перемещающего вала листогибочной машины. В этом технологическом процессе значение радиусагиба должно быть постоянным и меньше минимального радиуса кривизны контура [9].

Таким образом, необходимо исследовать возможности контроля с помощью оптико-электронной системы отклонения реальной формы обечаек от цилиндрической. Из-за особенностей технологического процесса производства обечаек в форме поперечного сечения преобладает эллипсность, или вторая гармоническая составляющая. Это обусловлено тем, что перед сваркой участку детали около сварного шва придается плоская форма, а поперечное сечение детали приобретает форму эллипса (в производстве обечаек эллипс часто называют овалом). Введем математическое определение профилограммы, что позволит выбрать подходящую схему измерения и выполнить расчет погрешности.

Для анализа бесцентрового метода измерения используем теорию функции комплексного переменного [10], с помощью которой определим функцию преобразования на комплексной плоскости реального профиля детали в профилограмму (рис. 2).

Для решения этой задачи введем ограничение и допущение, а именно аппроксимируем реальную форму поперечного сечения обечайки формой одной второй гармонической составляющей. Поэтому профиль детали представим в виде комплексного радиуса-вектора:

$$r(\varphi) = r_0 + r_m \sin(2\varphi), \quad (1)$$

где  $r_0$  — средний радиус профиля детали;  $r_m$  — амплитуда гармонической составляющей профиля детали.

Определим угол наклона касательной в точке А:

$$\beta = \arctg\left(\frac{(6\cos^2\varphi - 2)\sin\varphi r_m + \cos\varphi r_0}{(6\cos^3\varphi - 4\cos\varphi)r_m - \sin\varphi r_0}\right). \quad (2)$$

Аналогично выразим угол  $\beta_1$  — наклон касательной в точке F через производную к контуру с неизвестной координатой  $\varphi_1$ , затем выразим координату точки C относительно двух переменных

$$C = r(\varphi)e^{j\varphi} + Le^{j\beta} + He^{j\left(\beta + \frac{\pi}{2}\right)}, \quad (3)$$

$$C = r(\varphi_1)e^{j\varphi_1} + Le^{j\beta_1}, \quad (4)$$

где  $H$  — высота установки измерительного преобразователя;  $L$  — расстояние от центрального вала до места установки измерительного преобразователя;  $K$  — расстояние от измерительного преобразователя до точки касания оптического луча с поверхностью контролируемой детали.

Для определения координаты точки касания  $\varphi_1$  оптической оси оптико-электронного измерительного преобразователя к контуру детали составим равенство из правых частей уравнений:

$$e^{j\varphi}r(\varphi) + Le^{j\beta} + He^{j(\beta + \frac{\pi}{2})} = r(\varphi_1)e^{j\varphi_1} + Ke^{j\beta_1}. \quad (5)$$

Измерительный преобразователь прибора регистрирует угол  $\psi$ , показывающий наклон этого преобразователя относительно горизонта. С помощью данного угла возможно определить положение точки контролируемой поверхности. Для вычисления угла  $\psi$  необходимо из уравнения (5) предварительно найти угол  $\beta_1$ . Аналитически решить это уравнение сложно, поэтому оно решалось численно: в некотором диапазоне задавались значения угла  $\beta_1$  и определялось то, при котором выполняется равенство (5). Затем вычислялись значения угла  $\psi = \beta + \pi - \beta_1$ , а далее находился приведенный радиус детали  $r_{пр}$  с помощью следующей формулы [11]:

$$r_{пр} = \frac{L\sin\psi + H\cos\psi}{1 + \cos\psi}.$$

Поскольку с помощью этой схемы невозможно измерить текущий радиус профилограммы, для контроля величины овальности  $2r_m$  используется приведенный радиус детали, т. е. радиус цилиндрической детали, который соответствует координате точки касания оптической оси преобразователя.

На рис. 3 приведены развернутые профилограммы, полученные при моделировании деталей с различными значениями овальности и высоты установки измерительного преобразователя  $H$  (пунктир — профилограмма реальной детали для точки А, сплошная кривая — профилограмма, зарегистрированная с помощью измерительной системы; а —  $r_m/r_0 = 0,1$ ,  $H = 0,5r_m$ ; б —  $r_m/r_0 = 0,1$ ,  $H = 2r_m$ ; в —  $r_m/r_0 = 0,2$ ,  $H = 0,5r_m$ ; г —  $r_m/r_0 = 0,2$ ,  $H = 2r_m$ ).

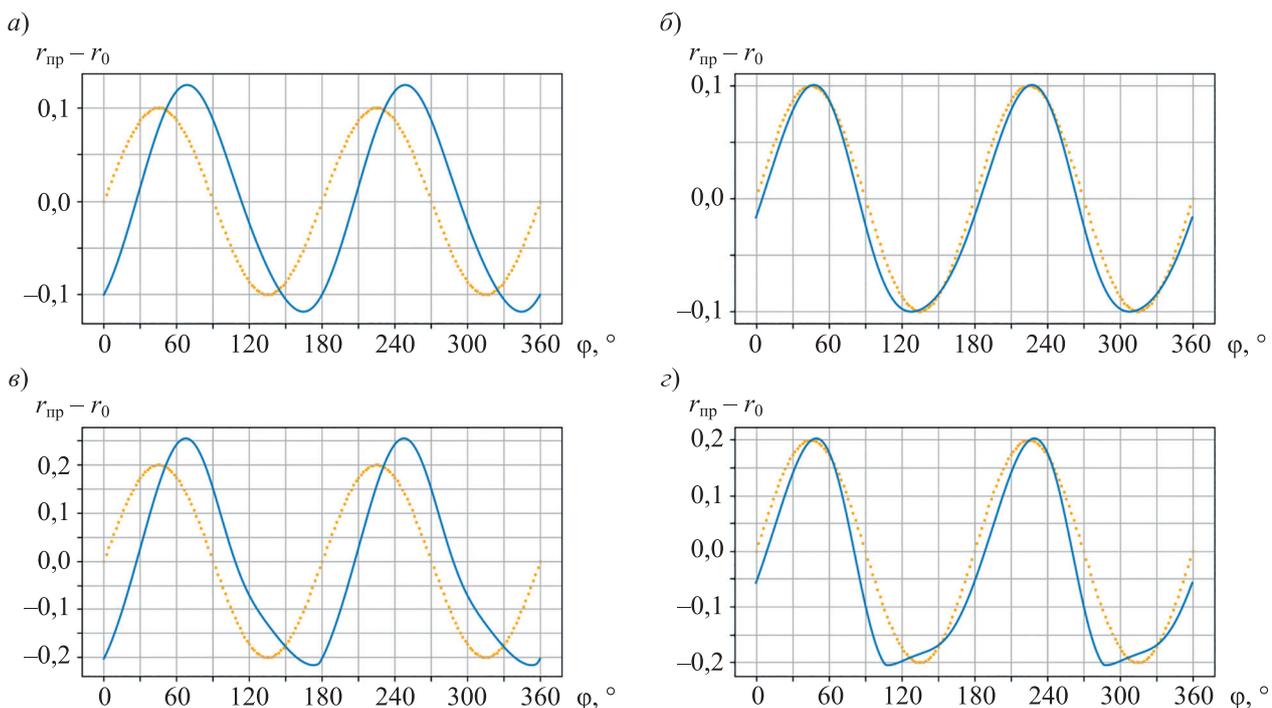


Рис. 3

Ошибка измерения эллиптичности определяется следующим образом:

$$\varepsilon = (r_{\text{пр}} - r_0)_{\text{max}} - (r_{\text{пр}} - r_0)_{\text{min}}$$

Установлено, что эта ошибка достигает минимального значения при  $H = 2r_0$ .

**Выводы.** Выполненное моделирование бесцентровой схемы контроля профилей крупногабаритных оболочек в процессе их формообразования показало, что при определенных параметрах схемы измерения (а именно при  $H = 2r_0$ ) возможно с минимальной погрешностью контролировать овальность и минимальный радиус кривизны контура детали. Полученные результаты контроля могут быть использованы для управления технологическим процессом формирования, а именно задания радиуса гибки по контуру.

Результаты разработки и исследования внедряются на промышленном предприятии „Волгограднефтемаш“.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2181190 РФ, МПК G01B 21/10. Оптическое устройство для измерения диаметров крупногабаритных деталей / А. Н. Шилин, С. А. Бедкин, Е. Г. Зенина. Заявл. 09.06.2000; опубл. 10.04.2002.
2. Пат. 171730 РФ, МПК G01B 11/08. Оптическое устройство для измерения диаметров крупногабаритных деталей / Д. Г. Сницарук, А. Н. Шилин. Заявл. 29.12.2016; опубл. 13.06.2017.
3. Рывкин А. А., Рывкин А. З., Хренов Л. С. Справочник по математике. М.: Высш. шк., 1987. 480 с.
4. Шилин А. Н. Исследование методических погрешностей оптико-электронных информационно-измерительных систем управления производством обечаек // Измерительная техника. 1989. № 10. С. 8–10.
5. Шилин А. Н. Моделирование геометрических преобразований при оптических измерениях профиля деталей // Изв. вузов. Приборостроение. 1999. Т. 42, № 5-6. С. 44–47.
6. Гебель И. Д. Бесцентровое измерение формы профиля тел вращения // Измерительная техника. 1973. № 3. С. 24–27.
7. Гебель И. Д. Инвариантные свойства отклонения профиля от круглой формы // Измерительная техника. 1978. № 11. С. 16–19.
8. Сергеев С. А., Горохов Л. Я. Общая схема измерения некруглости с виртуальным базированием // Изв. вузов. Приборостроение. 1999. № 5-6. С. 32–37.
9. Берлинер Ю. И., Балашов Ю. А. Технология химического и нефтяного аппаратостроения. М.: Машиностроение, 1976. 256 с.
10. Соломенцев Е. Д. Функции комплексного переменного и их применения. М.: Высш. шк., 1988. 167 с.
11. Шилин А. Н., Шилин А. А., Атаманюк Р. Г. Цифровой оптико-электронный измерительный прибор контроля крупногабаритных оболочек вращения // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 8. С. 671–679.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Александр Николаевич Шилин**

— д-р техн. наук, профессор; Волгоградский государственный технический университет, кафедра электротехники;  
E-mail: shanvstu@gmail.com

**Алексей Александрович Шилин**

— канд. техн. наук, доцент; Волгоградский государственный технический университет, кафедра электротехники; заведующий кафедрой;  
E-mail: shilin.jr@gmail.com

**Рамез Ганиевич Атаманюк**

— аспирант; Волгоградский государственный технический университет, кафедра электротехники; E-mail: atamanuk@gmail.com

Поступила в редакцию 25.03.24; одобрена после рецензирования 12.06.24; принята к публикации 23.08.24.

#### REFERENCES

1. Patent RU 2181190, G01B 21/10, *Opticheskoye ustroystvo dlya izmereniya diametrov krupnogabaritnykh detaley* (Optical Device to Measure Diameters of Large-Sized Parts), A.N. Shilin, S.A. Bedkin, E.G. Zenina, Priority 2000.06.09, Published 2002.04.10. (in Russ.)

2. Patent RU 171730, G01B 11/08, *Opticheskoye ustroystvo dlya izmereniya diametrov krupnogabaritnykh detaley* (Optical Device for Measuring the Diameters of Large Parts), D.G. Snitsaruk, A.N. Shilin, Priority 2016.12.29, Published 2017.06.13. (in Russ.)
3. Rvkin A.A., Rvkin A.Z., Khrenov L.S. *Spravochnik po matematike* (Handbook of Mathematics), Moscow, 1987, 480 p. (in Russ.)
4. Shilin A.N. *Measurement Techniques*, 1989, no. 10, pp. 8–10. (in Russ.)
5. Shilin A.N. *Journal of Instrument Engineering*, 1999, no. 5-6(42), pp. 44–47. (in Russ.)
6. Gebel I.D. *Measurement Techniques*, 1973, no. 3, pp. 24–27. (in Russ.)
7. Gebel I.D. *Measurement Techniques*, 1978, no. 11, pp. 16–19. (in Russ.)
8. Sergeev S.A., Gorokhov L.Ya. *Journal of Instrument Engineering*, 1999, no. 5-6, pp. 32–37. (in Russ.)
9. Berliner Yu.I., Balashov Yu.A. *Tekhnologiya khimicheskogo i neftyanogo apparatostroyeniya* (Technology of Chemical and Oil Apparatus Engineering), Moscow, 1976, 256 p. (in Russ.)
10. Solomentsev E.D. *Funktsii kompleksnogo peremennogo i ikh primeneniya* (Functions of a Complex Variable and Their Applications), Moscow, 1988, 167 p. (in Russ.)
11. Shilin A.N., Shilin A.A., Atamanyuk R.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 8(66), pp. 671–679. (in Russ.)

#### DATA ON AUTHORS

- |                            |   |   |
|----------------------------|---|---|
| <b>Alexander N. Shilin</b> | — | Dr. Sci., Professor; Volgograd State Technical University, Department of Electrical Engineering; E-mail: shanvstu@gmail.com                               |
| <b>Alexey A. Shilin</b>    | — | PhD, Associate Professor; Volgograd State Technical University, Department of Electrical Engineering; Head of the Department; E-mail: shilin.jr@gmail.com |
| <b>Ramez G. Atamaniuk</b>  | — | Post-Graduate Student; Volgograd State Technical University, Department of Electrical Engineering; E-mail: atamanuk@gmail.com                             |

Received 25.03.24; approved after reviewing 12.06.24; accepted for publication 23.08.24.

VARIABLE IMPEDANCE LEARNING CONTROL FOR ROBOTIC ARMS  
FROM GMR-ENCODED BEHAVIOR PRIORS

Waddah Ali, S. A. Kolyubin\*

*ITMO University, St. Petersburg, Russia*

\* *s.kolyubin@itmo.ru*

**Abstract.** This study presents a control approach, where Cartesian variable impedance control parameters are tuned online as the result of quadratic programming optimization dynamically modulating stiffness and damping coefficients based on desired sensory-motor skill encoded by Gaussian mixture regression behavior prior model.

**Keywords:** *learning from demonstration, variable impedance control, skill transfer, contact manipulation*

**For citation:** Waddah Ali, Kolyubin S. A. Variable impedance learning control for robotic arms from GMR-encoded behavior priors. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 10. P. 893–898. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-893-898.

УПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРАМИ С НАСТРОЙКОЙ ИМПЕДАНСНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ  
НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ СЕНСОРНО-МОТОРНЫХ НАВЫКОВ

Али Ваддах, С. А. Колюбин\*

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

\* *s.kolyubin@itmo.ru*

**Аннотация.** Представлен метод управления, при котором параметры импедансного регулятора в декартовом пространстве настраиваются в режиме реального времени посредством оптимизации на основе метода квадратичного программирования. Настройка параметров выполняется в соответствии с генерируемыми моделями сенсорно-моторных навыков, желаемыми профилями скоростей и сил взаимодействия инструмента робота с окружением.

**Ключевые слова:** обучение на основе демонстрации, управление переменным импедансом, передача навыков, манипуляция с контактом

**Ссылка для цитирования:** Ваддах Али, Колюбин С. А. Управление манипуляторами с настройкой импедансных регуляторов на основе моделей сенсорно-моторных навыков // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 893–898. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-893-898.

**Introduction.** This work is aimed at developing variable impedance learning control strategy (VIC) from collected behavior priors which is an extension to our previous work [1]. Imitation learning (IL) or learning by demonstration (LfD) techniques are tools that enable machines to imitate human behavior to perform a task [2, 3]. Standard LfD approaches have focused on path-following problems, but recent developments have expanded robot learning to the impedance domain [4]. In [5] an approach to improve Gaussian clusters then further Gaussian Mixture Model/Gaussian Mixture Regression (GMM/GMR) so that LfD enabled cobots can carry out a variety of complex manufacturing

tasks effectively was optimized. Stiffness matrices were estimated using residuals from the regression process instead of calculating the optimal stiffness subjected to generic constraints. Kinesthetic demonstrations were adopted in [6] to teach a robot change in stiffness based on tactile sensations. In this research, only desired trajectory was fed as input to the robotic manipulator while learning stiffness was by disturbing the robot during execution of the trajectory to learn the appropriate stiffness by cartesian/joint impedance controller. A similar approach was followed in [7] but use the constraints derived from [8] to ensure the convergence of the trajectory obtained using GMR.

In [9], the damping term from the interaction model was excluded and GMM was used to encode the end effector position. Work in [10] used LfD to study the motion and impedance parameters of two manipulators performing two-handed assembly. In their assessments, they show that adapting the impedance of both robots in both rotation and feed is beneficial because it allows the assembly task to be completed faster and with fewer joint movements.

**Problem Statement.** In this work the GMR behavior prior model (BP model) developed in [1] was adopted as a generator that takes time and material category  $\mathbf{U} = [\boldsymbol{\tau}^T, \mathbf{M}^T] \in \mathcal{R}^{2 \times N}$  as input and the outputs desired trajectory/ twist and wrench data  $\mathbf{V} = [\mathbf{P}^d, \boldsymbol{\xi}^d, \mathbf{W}^d] \in \mathcal{R}^{18 \times N}$ .

The case study focuses on the robot learning impedance parameters during straight cuts by fixing the X-axis orientation of the scalpel while allowing other angles to adjust, thus simplifying the problem by disregarding learned angular velocities and torques.

The dimensionality of the BP model output [1] was then reduced to

$$\mathbf{V} = [\mathbf{X}^d, \dot{\mathbf{X}}^d, \mathbf{F}^d] \in \mathcal{R}^{9 \times N},$$

where  $\mathbf{X}^d = [X^d, Y^d, Z^d] \in \mathcal{R}^{3 \times N}$ ,  $\dot{\mathbf{X}}^d = [\dot{X}^d, \dot{Y}^d, \dot{Z}^d] \in \mathcal{R}^{3 \times N}$  and  $\mathbf{F}^d = [F_x^d, F_y^d, F_z^d] \in \mathcal{R}^{3 \times N}$  are desired linear trajectory, velocity and Forces learnt from behavior priors model respectively.

The output was then fed to a QP (Quadratic programming) optimizer that allows online modulation of the stiffness of the Cartesian whole-body controller illustrated in Fig. 1.

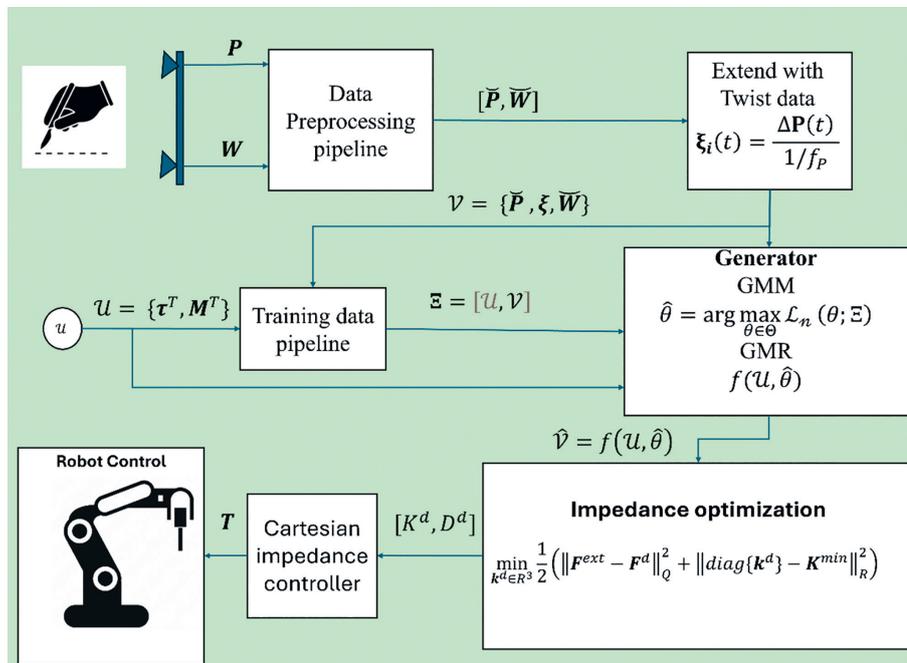


Fig. 1

The QP is formulated as follows:

$$\min_{\mathbf{K}_i^d, \boldsymbol{\xi}_i^d \in \mathcal{R}^{m \times m}} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\|\mathbf{F}_i^{\text{ext}} - \mathbf{F}_i^d\|_Q^2 + \|\mathbf{K}_i^d - \mathbf{K}^{\text{min}}\|_R^2)$$

s.t.

$$\begin{aligned}\mathbf{K}^{\min} &\leq \mathbf{K}_i^d \leq \mathbf{K}^{\max}; i \in \{1, \dots, N\}, \\ \xi^{\min} &\leq \xi_i^d \leq \xi^{\max}; i \in \{1, \dots, N\}, \\ \mathbf{F}^{\min} &\leq \mathbf{F}_i^{\text{ext}} \leq \mathbf{F}^{\max}; i \in \{1, \dots, N\}, \\ T(x_t) &\geq \epsilon,\end{aligned}$$

where inequality constraints are considered element-wise,  $m$  is the cartesian DoF number,  $\mathbf{K}_i^d, \mathbf{K}^{\min}, \mathbf{K}^{\max} \in \mathcal{R}^{m \times m}$  are the optimized, minimum and maximum stiffness matrices respectively,  $\xi_i^d, \xi^{\min}, \xi^{\max} \in \mathcal{R}^{m \times m}$  are the optimized, minimum and maximum damping ratio metrics respectively,  $\epsilon$  is the initial minimum tank energy that should be stored to maintain the system passivity,  $\mathbf{F}_i^{\text{ext}}$  the estimated external force generated on the scalpel blade during cutting process at time step  $i$ ,

$$\begin{aligned}\mathbf{F}_i^{\text{ext}} &= \mathbf{K}_i^d \tilde{\mathbf{X}}_i + \mathbf{D}_i^d \dot{\tilde{\mathbf{X}}}_i, \\ \tilde{\mathbf{X}} &= \mathbf{X} - \mathbf{X}^d, \\ \dot{\tilde{\mathbf{X}}} &= \dot{\mathbf{X}} - \dot{\mathbf{X}}^d, \\ \mathbf{D}_i^d &= 2\xi_i^d \sqrt{\mathbf{K}_i^d},\end{aligned}$$

where  $\tilde{\mathbf{X}}_i$  is the position error between the actual scalpel pos and desired one at time step  $i$ ,  $\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_i$  is the linear velocity error accordingly,  $T(x_t)$  is the tank that stores the energy and  $x_t$  is the state of the tank,

$$T(x_t) = \frac{1}{2} x_t^2,$$

the tank energy is initialized so that  $T(x_t(0)) > \epsilon$ .

Each time step  $i$ , the robot must be controlled via VIC controller that adjusts the stiffness for sake of reaching the desired cutting force at the instant position error  $\tilde{\mathbf{X}}_i$ . As this is done online, only the instant time step is considered in this approach. Thus, the problem statement is as follows:

$$\min_{\mathbf{K}_i^d, \xi_i^d \in \mathcal{R}^3} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\|\mathbf{F}^{\text{ext}} - \mathbf{F}^d\|_{\mathbf{Q}}^2 + \|\text{diag}(\mathbf{k}^d - \mathbf{K}^{\min})\|_{\mathbf{R}}^2)$$

s.t.

$$\begin{aligned}\mathbf{k}^{\min} &\leq \mathbf{k}^d \leq \mathbf{k}^{\max}, \\ \xi^{\min} &\leq \xi^d \leq \xi^{\max}, \\ \mathbf{F}^{\min} &\leq \mathbf{F}^{\text{ext}} \leq \mathbf{F}^{\max}, \\ T(x_t) &\geq \epsilon,\end{aligned}$$

where  $\mathbf{k}^d, \mathbf{k}^{\min}, \mathbf{k}^{\max} \in \mathcal{R}^3$  are the vectors of the diagonal elements of desired, minimum and maximum stiffness respectively,  $\xi^{\min}, \xi^d, \xi^{\max} \in \mathcal{R}^3$  the vectors of the diagonal elements of the desired, minimum and maximum damping ratio accordingly,  $\mathbf{Q}, \mathbf{R} \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$  are weighting matrices used to modulate the attention of the optimizer to the optimization terms.

**Experimental setup and technical details.** This study employed the iiwa KUKA LBR 14 robotic platform for two key experiments:

1. Force Estimation Calibration: This experiment aimed to verify the reliability of the external forces estimated by the robot's inverse dynamics. A Force/Torque (FT) sensor was integrated to compare the measured forces with the robot's estimated forces at the TCP (Tool Center Point) frame.

The robot was programmed to follow a predefined path on the plate's surface, applying different desired forces along the X-axis of the TCP frame: [15, 20, 25, 30, 35] N. Both the FT sensor and the

robot’s sensors recorded force data, which were filtered using an exponential moving average (EMA) filter ( $\alpha = 0.1$ ) to remove noise. The error between the measured and estimated forces was calculated using the formula:

$$e = F_x^{FT} - F_x^{TCP},$$

where  $e$  is the error signal,  $F_x^{FT}$ ,  $F_x^{TCP}$  are the recorded forces from FT sensor and the robot end-effector (TCP frame) respectively.

The mean and variance of the error were calculated, revealing a mean error of 4.29 N, which was deemed negligible. This small error was attributed to partial synchronization issues between the real FT sensor data and the robot’s ROS-based readings, confirming the reliability of the robot’s force estimation (refer to Fig. 2, *a* — force measured from FT sensor ( $F_x^{FT}$ ) vs. estimated force from robot inverse dynamics on TCP frame ( $F_x^{TCP}$ ); *b* — error value  $e$ ).

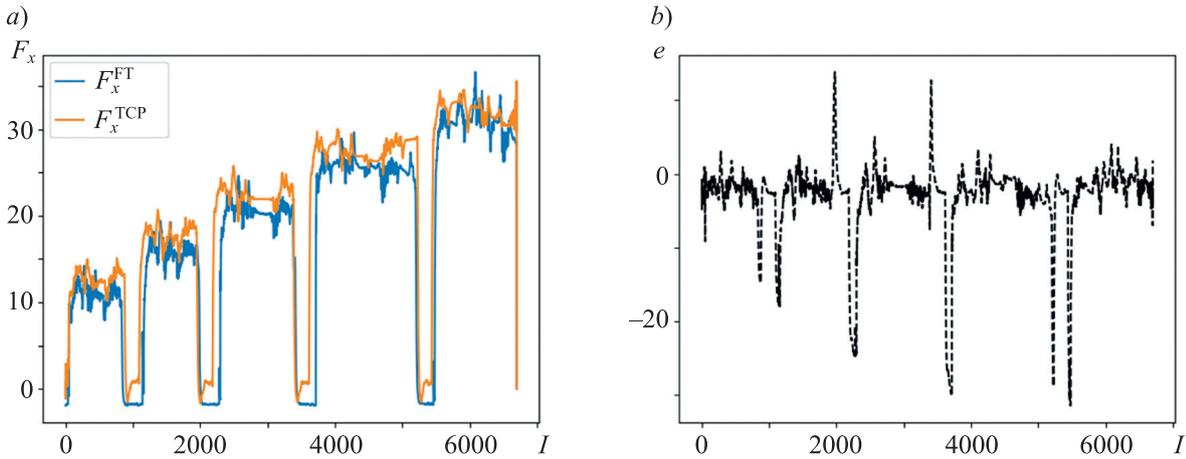


Fig. 2

2. Cutting experimental setup and stiffness optimization: Like the previous experiment, the robot (Fig. 3, using penoplex material as an example) was commanded using a ROS program script written in Python with the rospy library. However, in this setup, impedance control mode was used as the base controller. The desired stiffness was applied in three different scenarios: constant stiffness  $\mathbf{k} = [500, 500, 500]$  N/m, maximum allowed stiffness  $\mathbf{k}^{max}$ , and the online optimized stiffness  $\mathbf{k}^d$  from the QP optimizer output. These scenarios were tested on three different materials: cork, PVC, and penoplex.

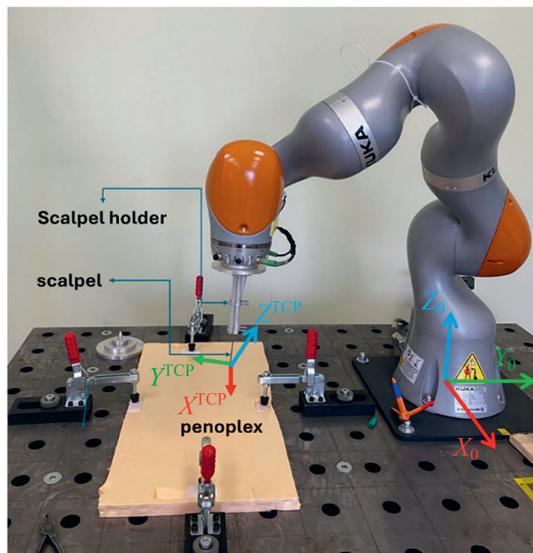


Fig. 3

The chosen values for the optimizer were as follows:  $\mathbf{k}^{min} = [10, 10, 10]$  N/m,  $\mathbf{k}^{max} = [5000, 5000, 5000]$  N/m,  $\xi^{min} = [0.0, 0.0, 0.0]$  N/m and  $\xi^{max} = [1.0, 1.0, 0.1]$  N/m. The bounds for the force component were chosen according to the maximum and minimum generated forces by BP model for each material  $\mathbf{F}^{min} = \min(\mathbf{F}^d)$ ,  $\mathbf{F}^{max} = \max(\mathbf{F}^d)$  with different bounds for different directions. Simultaneously, applying forces using constant stiffness i.e.,  $\mathbf{k}$  results in failure to achieve the required task.

Experimentally, the weighting matrices were set to be diagonal matrices as with values  $\mathbf{Q} = \mathbf{I}$ ,  $\mathbf{R} = \mathbf{I} \cdot 10^{-9}$ .

The Python programming language with SciPy library were used to adopt the QP optimizer, which relies on the bound-constrained optimization algorithm L-BFGS-B [11]. The position and velocity errors  $\tilde{\mathbf{X}}_i$ ,  $\dot{\tilde{\mathbf{X}}}_i$  together with the force dynamic constraints play an

essential role in the optimization behavior (Fig. 4 — optimization results for the online QP stiffness optimizer (PVC material): Figs. *a–c* represent the position error on  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  axes respectively; Figs. *d–f* represent how  $F^{\text{ext}}$  applied by robot using optimal impedance at each time step fits the desired force  $F^d$  produced by GMR-model on  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  respectively; Figs. *g–l* represent the values of the optimal impedance calculated by the optimizer on  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  axes respectively).

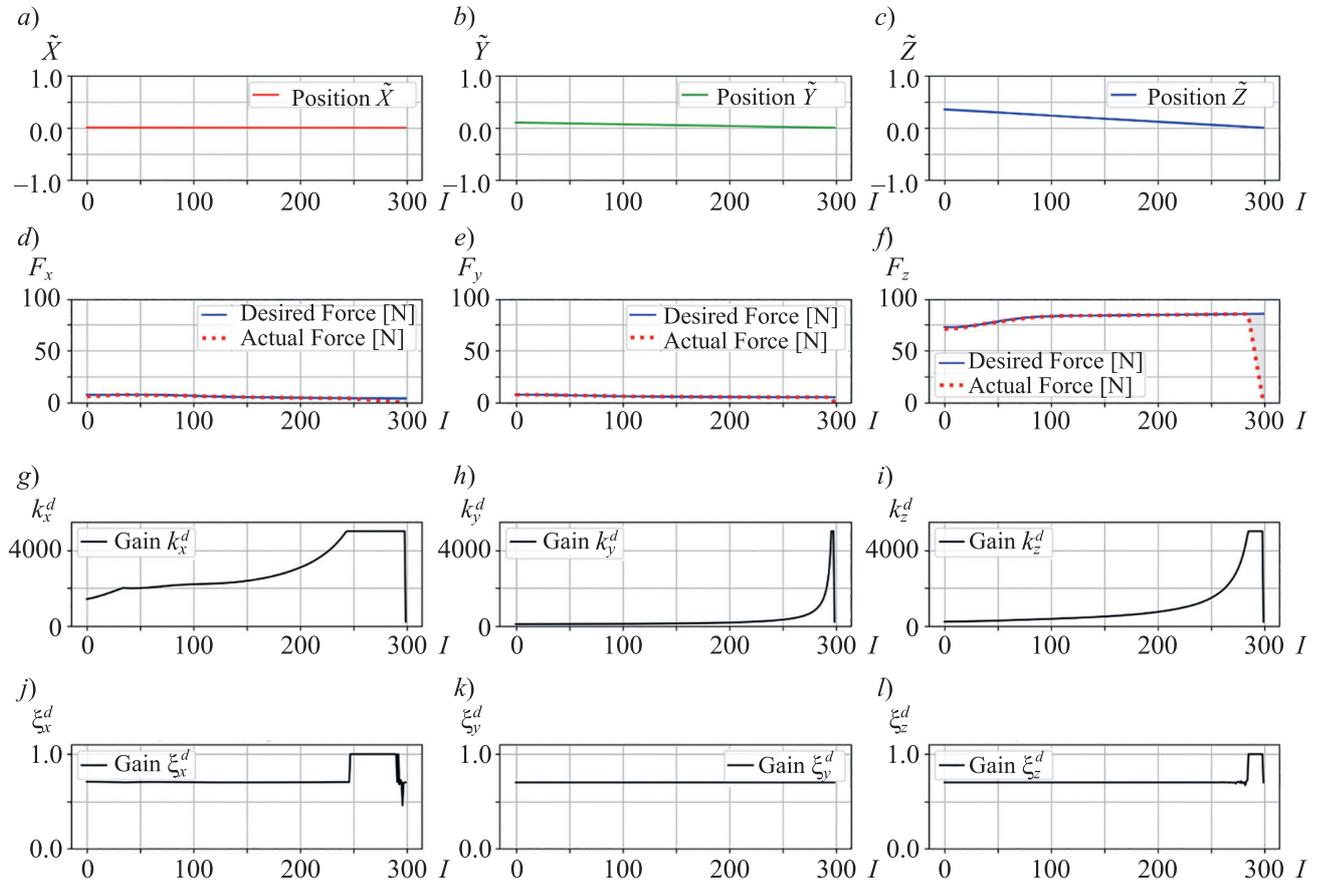


Fig. 4

**Conclusions and future work.** This study aimed at developing variable impedance learning control strategy (VIC) based on desired human sensory-motor skill encoded by GMR behavior prior model. Initial experiments confirmed the reliability of external force estimates through robot inverse dynamics using a specialized setup with a pointing tool and an FT sensor for accurate measurement. Subsequent experiments involved cutting different materials, where behavior priors guided a Quadratic Programming (QP) optimizer to tune stiffness and damping in real-time. The method's effectiveness was tested under various impedance scenarios: optimal, constant, and maximum. A notable innovation was the incorporation of developing a variable impedance control strategy where the motion dynamics are learnt from encoded human sensory-motor skill instead of classical tuning algorithms.

## REFERENCES

1. Ali Waddah, Kolyubin S.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2024, no. 6(67), pp. 500–510.
2. Hussein A., Gaber M.M., Elyan E., and Jayne C. *ACM Computing Surveys*, 2017, no. 2(50), art. 21, <https://doi.org/10.1145/3071073>.
3. Ravichandar H., Polydoros A.S., Chernova S., and Billard A. *Annual review of control, robotics, and autonomous systems*, 2020, no. 1(3), pp. 297–330, DOI:10.1146/annurev-control-100819-063206.
4. Abu-Dakka F.J. and Kyrki V. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Paris, France, 2020, pp. 4421–4426.

5. Wang Y.Q., Hu Y.D., El Zaatari S., Li W.D., Zhou Y. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, no. 9(71), pp. 102169, DOI:10.1016/j.rcim.2021.102169
6. Kronander K. and Billard A. *IEEE Transactions on Haptics*, 2014, vol. 7, pp. 367–380.
7. Saveriano M. and Lee D. *IEEE International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2014, pp. 368–373.
8. Khansari-Zadeh S.M. and Billard A. *IEEE Transaction on Robotics*, 2011, vol. 27, pp. 943–957.
9. Li M., Yin H., Tahara K., and Billard A. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Hong Kong, China, 2014, pp. 6784–6791.
10. Suomalainen M., Calinon S., Pignat E., and Kyrki V. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 8676–8682.
11. Byrd R.H., Lu P., and Nocedal J. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 1995, no. 5(16), pp. 1190–1208.

#### DATA ON AUTHORS

##### **Waddah Ali**

— Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, International Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; Engineer; E-mail: waddahkh.ali94@gmail.com

##### **Sergey A. Kolyubin**

— Dr. Sci.; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, International Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; Professor; Chief Researcher; E-mail: s.kolyubin@itmo.ru

Received 27.05.2024; approved after reviewing 26.06.2024; accepted for publication 23.08.2024

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ali Waddah, Kolyubin S. A. Training behavior priors models for programming robotic contact-rich manipulation // *Journal of Instrument Engineering*, 2024, Vol. 67, N 6. P. 500–510.
2. Hussein A., Gaber M. M., Elyan E., and Jayne C. Imitation learning: A survey of learning // *ACM Computing Surveys*. 2017. Vol. 50, N 2. Art. no. 21. <https://doi.org/10.1145/3071073>.
3. Ravichandar H., Polydoros A. S., Chernova S., and Billard A. Recent advances in robot learning from demonstration // *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2020. Vol. 3, N 1. P. 297–330. DOI:10.1146/annurev-control-100819-063206.
4. Abu-Dakka F. J. and Kyrki V. Geometry-aware dynamic movement primitives // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Paris, France, 2020. P. 4421–4426.
5. Wang Y. Q., Hu Y. D., El Zaatari S., Li W. D., Zhou Y. Optimised Learning from Demonstrations for Collaborative Robots // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2021. Vol. 71, N 9. P. 102169. DOI:10.1016/j.rcim.2021.102169.
6. Kronander K. and Billard A. Learning compliant manipulation through kinesthetic and tactile human-robot interaction // *IEEE Transactions on Haptics*. 2014. Vol. 7. P. 367–380.
7. Saveriano M. and Lee D. Learning motion and impedance behaviors from human demonstration // *IEEE International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2014. P. 368–373.
8. Khansari-Zadeh S. M. and Billard A. Learning stable non-linear dynamical systems with gaussian mixture models // *IEEE Transaction on Robotics*. 2011. Vol. 27. P. 943–957.
9. Li M., Yin H., Tahara K., and Billard A. Learning object-level impedance control for robust grasping and dexterous manipulation // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Hong Kong, China, 2014. P. 6784–6791.
10. Suomalainen M., Calinon S., Pignat E., and Kyrki V. Improving dual-arm assembly by master-slave compliance // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Montreal, QC, Canada, 2019. P. 8676–8682.
11. Byrd R. H., Lu P., and Nocedal J. A Limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization // *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*. 1995. Vol. 16, N 5. P. 1190–1208.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

##### **Ваддах Али**

— аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, Международная лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; инженер;  
E-mail: waddahkh.ali94@gmail.com

##### **Сергей Алексеевич Колюбин**

— д-р техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, Международная лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; профессор, г.н.с.;  
E-mail: s.kolyubin@itmo.ru

Поступила в редакцию 27.05.2024; одобрена после рецензирования 26.06.2024; принята к публикации 23.08.2024.

**СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ  
СОДЕРЖАЩИХ МЕТАКРИЛОВЫЕ МОНОМЕРЫ КОМПОЗИТОВ****Е. Е. Майоров***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург,  
Россия**majorov\_ee@mail.ru*

**Аннотация.** Спектрофотометрическим методом найдены оптические параметры фотополимеризованных композитов при температуре 20 и 47 °С и постоянном времени фотополимеризации (10 с). Получены зависимости коэффициента поглощения от длины волны образцов „Estelite Asteria“ оттенков OcE, A3B, A3,5B, B3B. Выявлено, что при нагревании композитов оптическое качество реставраций не снижалось.

**Ключевые слова:** время фотополимеризации, спектрофотометр, температура, композит, коэффициент поглощения

**Ссылка для цитирования:** Майоров Е. Е. Спектрофотометрический метод исследования содержащих метакриловые мономеры композитов // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 899–902. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-899-902.

**SPECTROPHOTOMETRIC METHOD FOR STUDYING COMPOSITES CONTAINING METHACRYLIC MONOMERS****E. E. Maiorov***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia**majorov\_ee@mail.ru*

**Abstract.** The optical parameters of photopolymerized composites at temperatures of 20 and 47 °C and a constant photopolymerization time (10 s) are found by the spectrophotometric method. The dependences of the absorption coefficient on the wavelength of Estelite Asteria samples of OcE, A3B, A3,5B, B3B shades are obtained. It is found that the optical quality of the restorations does not decrease when the composites are heated.

**Keywords:** photopolymerization time, spectrophotometer, temperature, composite, absorption coefficient

**For citation:** Maiorov E. E. Spectrophotometric method for studying composites containing methacrylic monomers. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 10. P. 899–902 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-899-902.

Методы и средства оптической спектроскопии широко применяются в фундаментальных научных и прикладных исследованиях [1] для бесконтактного [2] выявления состава, структуры и состояния объектов и сред. Спектральные приборы и комплексы служат для получения информации о монохроматических составляющих спектра при разложении электромагнитного излучения с последующей фиксацией отдельных компонентов либо их диапазона [3–6]. Каждый вид спектроскопии (электронная, спектральная, вращательная [7]) характеризуется своим диапазоном электромагнитного излучения и соответствующими изменениями в структуре исследуемого объекта при поглощении светового излучения [8]. При исследованиях веществ в различном агрегатном состоянии необходимо подбирать метод, который мог бы дать максимальную информацию о составе и структуре этих веществ.

Современные композитные материалы широко используются для эстетического восстановления твердых тканей зубов [9–13]. Их уникальные биохимические и физико-механические свойства позволяют успешно реставрировать зубы с дефектами разной сложности [14, 15]. С течением времени (от одного года до двух) композит в шприцах изменяет агрегатное состояние

с жидкого (вязкого) на твердое. Поэтому целью эксперимента было выявить: сохранит ли затвердевший композит после нагрева до  $T = 47\text{ }^{\circ}\text{C}$ , обеспечивающего ему возвращение в вязкое состояние, и дальнейшей фотополимеризации заявленные в инструкции физико-химические свойства.

С помощью автоматизированного спектрофотометра „UV-3600i Plus“ компании „Shimadzu“ (Япония) измерены спектры поглощения электромагнитных волн образцов светоотверждаемого композитного материала для прямой реставрации зубов „Estelite Asteria“ (оттенки OcE, A3B, A3,5B, B3B). Объекты исследования были предоставлены ООО „Центр имплантации и комплексного лечения“ (Санкт-Петербург).

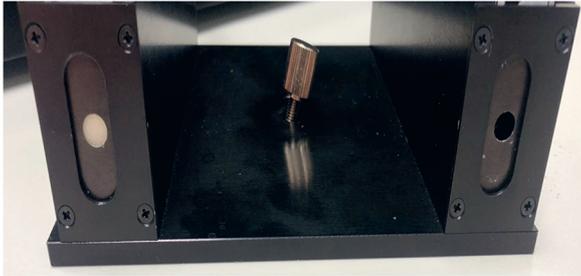


Рис. 1

Исследуемые образцы фиксировались прижимным механизмом в металлическом окошке, установленном в объектном канале измерений таким образом, чтобы через центр окошка проходил световой луч (рис. 1).

Диаметр образца не должен превышать 15 мм, а толщина — не более 400 мкм, поэтому материалы помещались в специальные контейнеры, придававшие образцу форму плоского диска. Материалы разных оттенков имели температуру  $T = 20$  и  $47\text{ }^{\circ}\text{C}$  и облучались светодиодной (LED) лампой, работающей в диапазоне длин волн от

400 до 500 нм при времени фотополимеризации  $t = 10$  с.

На рис. 2 проиллюстрированы экспериментально полученные спектральные зависимости коэффициента поглощения  $K$  от длины волны  $\lambda$  (оттенок OcE: 1 —  $T = 20$ , 2 —  $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; A3B: 3 — 20, 4 —  $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; A3, 5B: 5 — 20, 6 —  $47$ ; B3B: 7 — 20, 8 —  $47$ ).

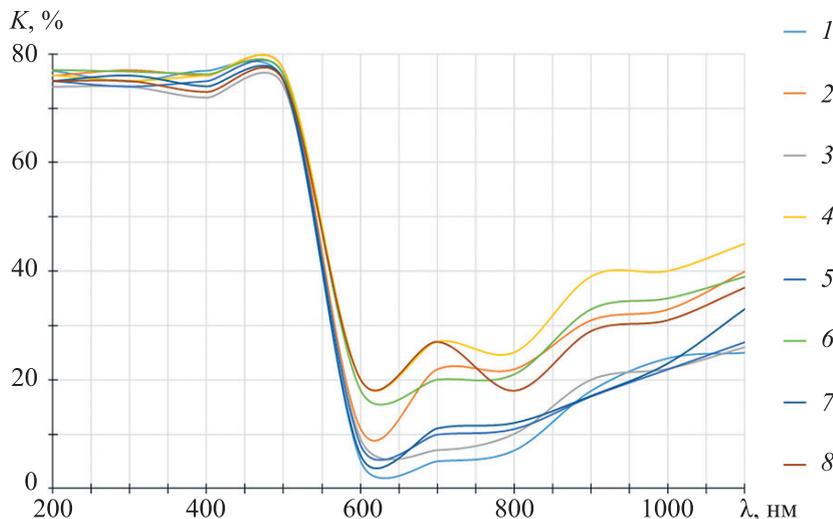


Рис. 2

Спектральные кривые исследуемых образцов в области  $\lambda = 200\text{--}600$  нм имели схожие по форме распределения, характерных сдвигов зависимостей коэффициента поглощения от длины волны не наблюдалось. В области  $\lambda = 600\text{--}1100$  нм максимальное поглощение выявлено у образцов при  $T = 47\text{ }^{\circ}\text{C}$ , видимо, это обусловлено термодинамическими параметрами и существенными колебаниями связей в структуре изучаемого объекта.

Полученные спектральные коэффициенты поглощения композита „Estelite Asteria“ (OcE, A3B, A3.5B, B3B), отвержденного со стандартизированной экспозицией фотополимеризации  $t = 10$  с при температуре 20 и  $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ , представляют интерес для эстетической стоматологии. Выявлено, что при этих параметрах материал сохраняет хорошие оптические качества реставрации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишловский А. А. Прикладная физическая оптика. М.: ФизматГИЗ, 1970. 822 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
3. Тарасов К. И. Спектральные приборы. М.: Машиностроение, 1968. 389 с.
4. Князева М. А. Виды стоматологических фотополимеризационных устройств и их сравнительная характеристика // Вестник ВГМУ. 2011. Т. 10, № 4. С. 138–147.
5. Дуглас А. Т. Возможности цвета: создание высокодиффузных слоев с композитом // Клиническая стоматология. 2004. № 2. С. 4–11.
6. Исаева Т. М. Еще раз о проблеме цвета в эстетической стоматологии. Возвращаясь к технике реставрации зубов // Клиническая стоматология. 2003. № 4. С. 22–24.
7. Луцкая И. К. Практическая стоматология. Мн.: Бел. наука, 1999. 360 с.
8. Maiorov E. E., Prokopenko V. T., Ushveridze L. A. A system for the coherent processing of specklegrams for dental tissue surface examination // Biomedical Engineering. 2014. Vol. 47, N 6. P. 304–306. DOI: 10.1007/s10527-014-9397-2.
9. Maiorov E. E., Shalamay L. I., Dagaev A. V., Kirik D. I., Khokhlova M. V. An interferometric device for detecting subgingival caries // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53. P. 258–261. DOI: 10.1007/s10527-019-09921-0.
10. Майоров Е. Е., Афанасьева О. В., Курлов В. В., Таюрская И. С., Соколовская М. В. Применение спектрофотометрического метода для исследования содержания этилового спирта в жидкофазных средах // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 6. С. 501–508. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-501-508.
11. Шаламай Л. И., Оксас Н. С., Лампусова В. Б., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е. Спектральный анализ новейших стоматологических материалов для эстетики и реставраций на твердых тканях зуба // Dental Forum. 2023. № 2(89). С. 29–33.
12. Шаламай Л. И., Оксас Н. С., Лампусова В. Б., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е. Оценка применения различных технологий адгезива химического отверждения при проникновении в дентин зуба // Dental Forum. 2023. № 3(90). С. 29–35.
13. Шаламай Л. И., Майоров Е. Е., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Абсорбционный спектральный анализ светоотверждаемых рентгеноконтрастных материалов „Омнихрома“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 9. С. 781–788. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-781-788.
14. Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Исследование новых светоотверждаемых композитных стоматологических материалов методом атомно-абсорбционной спектроскопии // Стоматология для всех. 2023. № 3(104). С. 46–52. DOI.org/10.35556/idr-2023-3(104)46-52.
15. Шаламай Л. И., Майоров Е. Е., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Спектрофотометрическое исследование образцов контрольной фиксации наполнителя к шлифу зуба стоматологическим цементом // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 10. С. 887–894. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-887-894.

Поступила в редакцию 11.02.24; одобрена после рецензирования 05.03.24; принята к публикации 23.08.24.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Евгений Евгеньевич Майоров**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; доцент; E-mail: majorov\_ee@mail.ru

## REFERENCES

1. Shishlovsky A.A. *Prikladnaya fizicheskaya optika* (Applied Physical Optics), Moscow, 1970, 822 p. (in Russ.)
2. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*, Pergamon Press, 1959.
3. Tarasov K.I. *Spektral'nyye pribory* (Spectral Devices), Moscow, 1968, 389 p. (in Russ.)
4. Knyazeva M.A. *Vestnik Vitebskogo Gosudarstvennogo Meditsinskogo Universiteta*, 2011, no. 4(10), pp. 138–147. (in Russ.)
5. Douglas A.T. *Klinicheskaya stomatologiya*, 2004, no. 2, pp. 4–11. (in Russ.)
6. Isayeva T.M. *Klinicheskaya stomatologiya*, 2003, no. 4, pp. 22–24. (in Russ.)
7. Lutsкая I.K. *Prakticheskaya stomatologiya* (Practical Dentistry), Minsk, 1999, 360 p. (in Russ.)
8. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. *Biomedical Engineering*, 2014, no. 6(47), pp. 304–306, DOI: 10.1007/s10527-014-9397-2. (in Russ.)
9. Maiorov E.E., Shalamay L.I., Dagaev A.V., Kirik D.I., Khokhlova M.V. *Biomedical Engineering*, 2019, vol. 53, pp. 258–261, DOI: 10.1007/s10527-019-09921-0.

10. Maiorov E.E., Afanasyeva O.V., Kurlov V.V., Tayurskaya I.S., Sokolovskaya M.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 6(66), pp. 501–508, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-501-508. (in Russ.)
11. Shalamay L.I., Oksas N.S., Lampusova V.B., Mendosa E.Yu., Maiorov E.E. *Dental Forum*, 2023, no. 2(89), pp. 29–33. (in Russ.)
12. Shalamay L.I., Oksas N.S., Lampusova V.B., Mendosa E.Yu., Maiorov E.E. *Dental Forum*, 2023, no. 3(90), pp. 29–35.
13. Shalamay L.I., Maiorov E.E., Mendosa E.Yu., Lampusova V.B., Oksas N.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 9(66), pp. 781–788, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-781-788
14. Shalamay L.I., Mendosa E.Yu., Maiorov E.E., Lampusova V.B., Oksas N.S. *Dentistry for everyone*, 2023, no. 3(104), pp. 46–52, DOI.org/10.35556/idr-2023-3(104)46-52. (in Russ.)
15. Shalamay L.I., Maiorov E.E., Mendosa E.Yu., Lampusova V.B., Oksas N.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 10(66), pp. 887–894, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-887-894. (in Russ.)

#### DATA ON AUTHOR

**Evgeny E. Maiorov**

— PhD, Associate Professor; Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics;  
E-mail: majorov\_ee@mail.ru

Received 11.02.24; approved after reviewing 05.03.24; accepted for publication 23.08.24.