

ISSN 2500—0381
Электронная версия

ISSN 0021—3454
Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

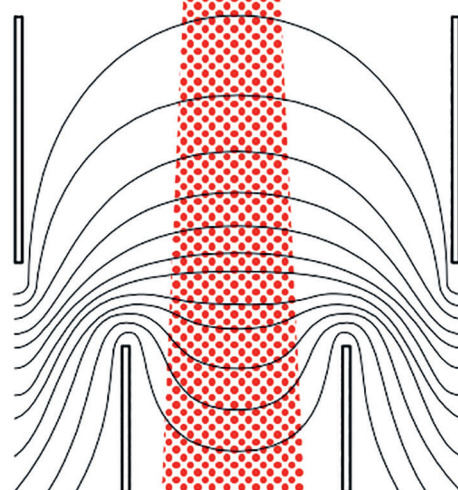
П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ **7**

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 «Электрон», Санкт-Петербург, Россия
В. Д. ЛУКЬЯНОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., ОАО «Авангард», Санкт-Петербург, Россия
А. В. ЛЯМИН, д-р техн. наук, доцент, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
А. В. МАЛОЛЕТОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет Иннополис, Иннополис, Россия
Ю. Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук, ООО «ЦРТ-инновации», Санкт-Петербург, Россия
В. М. МЕДУНЕЦКИЙ, д-р техн. наук, проф., ООО «Феррум», Санкт-Петербург, Россия
А. Н. МИРОНОВ, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
В. М. МУСАЛИМОВ, д-р техн. наук, проф., ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия
А. А. ОЖИГАНОВ, д-р техн. наук, проф., АО «НИТИ «Авангард», Санкт-Петербург, Россия
А. А. ПЫРКИН (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. С. СИЗИКОВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Б. В. СОКОЛОВ, д-р техн. наук, проф., СПбФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия
С. В. СОЛК, д-р техн. наук, НИИ ОЭП, Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия
В. Ю. ТЕРТЫЧНЫЙ, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Д. В. ТИТОВ, д-р техн. наук, доцент, ЮЗГУ, Курск, Россия
А. В. ФЕДОРОВ, д-р техн. наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Н. Б. ФИЛИМОНОВ (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
И. Б. ФУРТАТ, д-р техн. наук, доцент, ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия
В. П. ХОДУНКОВ, канд. техн. наук, ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия*

Ответственный секретарь М. В. Лебецкая

Редактор И. М. Игошина

Набор, верстка: Е. С. Егорова

Перевод: Ю. И. Копилевич

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

Подписано в печать 05.08.2024 г.

*Отпечатано в учреждении „Университетские телекоммуникации“
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А
Телефон: (812) 915-14-54, E-mail: Prudentov@tibir.ru*

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

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

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

Список литературы: для обзорной статьи рекомендуется приводить не менее 50 источников, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8.

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



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

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

Журнал содержит следующие разделы:

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

По договоренности с Редакцией может быть опубликован специальный тематический выпуск, посвященный достаточно узкой проблеме приборостроения.

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

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

Рукопись должна содержать:

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

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

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

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

Формулы и отдельные символы набираются с использованием только редактора формул MathType.

Не вставлять формулы из пакетов MathCad и MatLab. Размер шрифта в формулах — по умолчанию. Все переменные набираются курсивом, греческие буквы — прямым шрифтом, полужирные символы в формуле — стилем „матрица вектор“, русские символы — стилем „текст“, векторы следует набирать полужирным шрифтом без стрелок.

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

Плата за публикацию не взимается.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Нгуен К. К., Пыркин А. А., Голубев А. К. Алгоритмы бездатчикового управления асинхронным двигателем с использованием адаптивных наблюдателей 551
- Морозов О. А., Сорохтин Е. М., Сорохтин М. М. Реализация алгоритма двухступенчатой нелинейной цифровой фильтрации сигналов на основе метода минимальной дисперсии 559

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- Сергеев М. М., Пушкарева А. Е., Греско В. Р. Моделирование теплового источника в пленке с наночастицами при воздействии ультракоротких лазерных импульсов 567

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Каримов А. И., Стрельников М. Д., Мазин С. В., Горюнов Д. С., Кулагин М. В., Каримов Т. И. Модель сухой кисти для робототехнической живописи 574

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

- Фомин Д. В., Голых А. Е. Имитатор транспортно-пускового контейнера для вибродинамических испытаний наноспутников стандарта CubeSat 6U 586
- Жданович С. В., Зеневич А. О., Коваленко Т. Г., Мансуров Т. М., Новиков Е. В. Оптическое волокно как основа для создания сигнализатора кипения жидкости 593
- Сандуляк Д. А. Варианты магнитно-реологического метода контроля магнитной восприимчивости одиночной частицы 599
- Майоров Е. Е., Костин Г. А., Курлов В. В., Баранов Н. Е. Исследование современных авиационных гидравлических жидкостей на основе фосфатного эфира рефрактометрическим методом 609

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

- Евдулов О. В., Ибрагимова А. М., Дайзиев З. М. Термоэлектрическое устройство для лечения панариция методом локальной гипотермии 615

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРИБОРОВ

- Коробков М. А. Применение установки прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы для компенсации деформации печатных плат 622

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. Lebedskaya

Editor Irina M. Igoshina

Page-proof, makeup Ekaterina S. Egorova

Translation of Yuriy I. Kopilevich

Address: ITMO University, Kronverksky pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia, 197101
Tel: (812) 480-02-73
Site: pribor.ifmo.ru
E-mail: pribor@itmo.ru

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 67

JULY 2024

№ 7

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL, AND INFORMATION PROCESSING

- Nguyen Q. C., Pyrkin A. A., Golubev A. K.** Sensorless Control Algorithm for Induction Motor Using Adaptive Observers 551
- Morozov O. A., Sorokhtin E. M., Sorokhtin M. M.** Implementation of a Two-Stage Nonlinear Digital Filtering Algorithm Based on the Minimum-Variance Method 559

COMPUTER SIMULATION AND DESIGN AUTOMATION

- Sergeev M. M., Pushkareva A. E., Gresko V. R.** Modeling of a Heat Source in a Film with Nanoparticles Under the Action of Ultrashort Laser Pulses. 567

ROBOTS, MECHATRONICS, AND ROBOTIC SYSTEMS

- Karimov A. I., Strelnikov M. D., Mazin S. V., Goryunov D. S., Kulagin M. V., Karimov T. I.** Dry Brush Model for Robotic Painting 574

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

- Fomin D. V., Golykh A. E.** Simulator of a Transport and Launch Container for Vibrodynamic Tests of CubeSat 6U Standard Nanosatellites 586
- Zhdanovich S.V., Zenevich A. O., Kovalenko T. G., Mansurov T. M., Novikov E. V.** Optical Fiber as A Basis for Creating a Liquid Boiling Alarm 593
- Sandulyak D. A.** Variants of Magnetic-Rheological Method for Monitoring the Magnetic Susceptibility of a Single Particle. 599
- Maierov E. E., Kostin G. A., Kurlov V. V., Baranov N. E.** Study of Modern Aviation Hydraulic Fluids Based on Phosphate Ester by Refractometric Method 609

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS, AND PRODUCTS

- Yevdulov O. V., Ibragimova A. M., Daiziev Z. M.** Thermoelectric Device for the Treatment of Panaritium by Local Hypothermia. 615

DESIGN AND PRODUCTION TECHNOLOGY OF INSTRUMENTS

- Korobkov M. A.** Application of the Direct Exposure Unit Based on LS-Matrix for Compensation of Printed Circuit Boards Deformation 622

To the Authors!

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

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

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

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

Submission includes two copies of:

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

— extended abstract (150—250 words);

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

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

— the recommendation of the Department (laboratory);

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

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

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

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

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

Don't insert formulas from MathCad or MatLab!

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

Editorial Staff

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL, AND INFORMATION PROCESSING

УДК 681.5
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-551-558

АЛГОРИТМЫ БЕЗДАТЧИКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНЫХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ

К. К. Нгуен, А. А. Пыркин, А. К. Голубев*

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

Аннотация. Рассмотрены математические модели асинхронного электродвигателя, на базе одной из которых предложено адаптивное непрямое полеориентированное управление, позволяющее обеспечить регулирование заданного крутящего момента и скорости вращения ротора несмотря на неизвестные момент нагрузки, сопротивление и индуктивность ротора.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, полеориентированное управление, адаптивное управление, бессенсорное управление.

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

Ссылка для цитирования: Нгуен К. К., Пыркин А. А., Голубев А. К. Алгоритмы бездатчикового управления асинхронным двигателем с использованием адаптивных наблюдателей // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 7. С. 551–558. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-551-558.

SENSORLESS CONTROL ALGORITHM FOR INDUCTION MOTOR USING ADAPTIVE OBSERVERS

Q. C. Ngyen, A. A. Pyrkin, A. K. Golubev*

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

Abstract. Mathematical models of induction motor are considered. Based on one of the models, an adaptive indirect field-oriented control algorithm is proposed that allows maintaining specified values of torque and the rotor angular velocity despite the fact that the load torque, rotor resistance and inductance are unknown.

Keywords: induction motor, field-oriented control, adaptive control, sensorless control

Acknowledgments: The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, state assignment No. 2019-0898.

For citation: Ngyen Q. C., Pyrkin A. A., Golubev A. K. Sensorless control algorithm for induction motor using adaptive observers. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 7. P. 551–558 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-551-558.

Введение. Развитие современных методов синтеза адаптивных наблюдателей для нелинейных систем открывает новые возможности при разработке систем бездатчикового (бессенсорного) управления в технических системах. Особенно актуальной является разработка бессенсорного управления применительно к двигателям переменного тока. Наиболее широко

распространенные электродвигатели — трехфазные асинхронные машины благодаря простоте конструкции и надежной работе.

Способы управления двигателями переменного тока подробно изложены в большом количестве публикаций [1–3]. В настоящей статье внимание сосредоточено на векторном полеориентированном управлении (field-oriented control), впервые предложенном в [4] и обобщенном в [5]. При использовании этого способа предполагается независимое управление скоростью и крутящим моментом электродвигателя при переменном моменте нагрузки. Достоинство такого подхода — математическое разделение контуров управления электромагнитной и механической динамикой. Наряду с классическим полеориентированным управлением [4, 5] известен также метод непрямого полеориентированного управления асинхронным двигателем [6, 7], в котором для формирования закона управления не требуется мгновенное значение потоко-сцепления.

Эти методы, несмотря на безусловные достоинства и преимущества по сравнению с простейшим в реализации скалярным управлением, имеют, однако, серьезные недостатки, касающиеся требований по точному знанию сопротивления ротора и индуктивности обмоток статора. Поскольку при работе электродвигатель неизбежно нагревается, значения этих параметров меняются со временем, что негативно влияет на показатели качества и устойчивости системы управления электроприводом. В [8] предпринята попытка синтезировать алгоритм адаптивного управления по выходу с одновременным оцениванием сопротивления, индуктивности и момента нагрузки. Следует отметить, что полученный алгоритм обладает высокой динамической размерностью, что может привести к затруднениям на стадии программной реализации в микроконтроллере, поскольку известно, что нелинейные алгоритмы адаптации при приближенной дискретизации чувствительны к параметрам регулятора и могут терять устойчивость.

В настоящей работе систематизированы математические модели асинхронного двигателя, на базе которых целесообразно синтезировать алгоритмы управления. Предложен алгоритм адаптивного непрямого полеориентированного управления без использования датчиков регулируемых переменных: потоко-сцепления и крутящего момента. Показано, что можно отказаться и от датчиков положения или скорости вращения ротора, заменив их соответствующим адаптивным наблюдателем и реализовав таким образом бездатчиковое управление.

Математические модели асинхронного двигателя. Рассмотрим динамическую модель асинхронного двигателя в двухфазной неподвижной системе координат, связанной со статором [1–3]:

$$\frac{d\mathbf{i}_{\alpha\beta}}{dt} = -\left(\frac{R_s}{L_s\sigma} + \frac{R_r L_{sr}^2}{\sigma L_s L_r^2}\right)\mathbf{i}_{\alpha\beta} + \frac{L_{sr}}{\sigma L_s L_r} \left(\frac{R_r}{L_r} \mathbf{I} - n_p \omega \mathbf{J}\right) \boldsymbol{\lambda}_{\alpha\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} \mathbf{v}_{\alpha\beta}; \quad (1)$$

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}}_{\alpha\beta} = -\left(\frac{R_r}{L_r} \mathbf{I} - n_p \omega \mathbf{J}\right) \boldsymbol{\lambda}_{\alpha\beta} + \frac{R_r L_{sr}}{L_r} \mathbf{i}_{\alpha\beta}; \quad (2)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{D} (\tau_E - \tau_L); \quad (3)$$

$$\tau_E = \frac{n_p L_{sr}}{L_r} \mathbf{i}_{\alpha\beta}^T \boldsymbol{\lambda}_{\alpha\beta}, \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\lambda}_{\alpha\beta} = [\lambda_\alpha, \lambda_\beta]^T$ — потоко-сцепление ротора; $\mathbf{i}_{\alpha\beta} = [i_\alpha, i_\beta]^T$ — сила тока в обмотках статора; $\mathbf{v}_{\alpha\beta} = [v_\alpha, v_\beta]^T$ — питающее напряжение в обмотках статора; R_s, R_r — сопротивления статора и ротора; L_s, L_r — индуктивности статора и ротора, L_{sr} — взаимная индукция статора и ротора; $\sigma = 1 - \frac{L_{sr}^2}{L_s L_r} > 0$ — коэффициент электромагнитного рассеяния в воздушном зазоре асинхронного двигателя; n_p — число пар полюсов; ω — скорость вращения ротора; D —

момент инерции ротора; τ_E — электромагнитный момент, τ_L — момент нагрузки, матрицы $\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ и $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$.

Во многих практических приложениях используются регуляторы тока с высоким коэффициентом усиления (иногда с пропорционально-интегральным контуром) для того, чтобы обеспечить силу тока в статоре $\mathbf{i}_{\alpha\beta}$, равную желаемой $\mathbf{i}_{\alpha\beta}^*$:

$$\mathbf{v}_{\alpha\beta} = \frac{1}{\epsilon}(\mathbf{i}_{\alpha\beta}^* - \mathbf{i}_{\alpha\beta}), \quad (5)$$

где ϵ — небольшое положительное число.

В предельном случае при $\epsilon \rightarrow 0$ модель (1)–(5) существенно упрощается до вида (2)–(4), где вектор $\mathbf{i}_{\alpha\beta} = \mathbf{i}_{\alpha\beta}^*$ может рассматриваться как входное управляющее воздействие. Однако модель (2)–(4) сохраняет существенно нелинейный вид, что усложняет синтез закона управления.

Рассмотрим вращающуюся систему координат, связанную с ротором, и введем замену координат по управляющему току и магнитному потоку ротора:

$$\mathbf{u} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(n_p\theta) & \sin(n_p\theta) \\ -\sin(n_p\theta) & \cos(n_p\theta) \end{bmatrix} \mathbf{i}_{\alpha\beta}, \quad \boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \cos(n_p\theta) & \sin(n_p\theta) \\ -\sin(n_p\theta) & \cos(n_p\theta) \end{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{\alpha\beta}, \quad (6)$$

где θ — угол поворота ротора и $\dot{\theta} = \omega$; тогда модель (2)–(4), (6) примет вид

$$\frac{L}{R} \dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{u}; \quad (7)$$

$$D\dot{\omega} = \tau_E - \tau_L; \quad (8)$$

$$\tau_E = \mathbf{u}^T \mathbf{J} \boldsymbol{\lambda}, \quad (9)$$

где для упрощения введены обозначения $R = R_r$, $L = L_r$.

Для модели (7)–(9) известны алгоритмы управления $\mathbf{u}$ для обеспечения заданного крутящего момента τ и заданной угловой скорости ω на основе метода непрямого полеориентированного управления [6, 7] при допущении, что момент нагрузки постоянный и точно известны значения сопротивления R и индуктивности L .

Для обеспечения устойчивости и заданных показателей качества в замкнутом контуре с дискретным регулятором целесообразно рассматривать точную разностную модель объекта управления. Для линейных динамических моделей такой переход тривиален, тогда как для модели асинхронного двигателя совсем не очевиден. Тем не менее, как показано в [7], точная дискретная модель асинхронного двигателя может быть вычислена согласно (7)–(9):

$$\boldsymbol{\lambda}_{k+1} = a\boldsymbol{\lambda}_k + (1-a)\mathbf{u}_k; \quad (10)$$

$$\tau_k = b\mathbf{u}_k^T \mathbf{J} \boldsymbol{\lambda}_k; \quad (11)$$

$$\omega_{k+1} = \omega_k + c\tau_k - d\tau_L, \quad (12)$$

где $a = e^{-\frac{R}{L}T}$, $b = \frac{n_p}{L}$, $c = \frac{(1-a)L}{DR}$, $d = \frac{T}{D}$ — соответствующие параметры разностной модели с интервалом дискретизации T , обозначение $z_k = z(kT)$, $k \in \mathbb{Z}_+$, соответствует значению непрерывного сигнала $z(t)$ в момент времени $t = kT$.

В этой же работе предложен алгоритм управления крутящим моментом и скоростью вращения ротора при допущении о точно известных параметрах модели:

$$\mathbf{u}_k = e^{\mathbf{J}p_k} \begin{pmatrix} \frac{\Psi_{k+1}^d}{1-a} \cos\beta_k - \frac{a}{1-a} \Psi_k^d \\ \frac{L}{\Psi_k^d n_p} \tau_k^d \end{pmatrix}; \quad (13)$$

$$\rho_{k+1}^d = \rho_k^d + \beta_k, \rho_0 = 0; \quad (14)$$

$$\beta_k = \arcsin\left(\frac{L(1-a)}{n_p \Psi_{k+1}^d \Psi_k^d} \tau_k^d\right); \quad (15)$$

$$\tau_k^d = \left[K_p + \frac{K_I}{q-1} \right] (\omega_d - \omega_k), \quad (16)$$

где τ_k^d — желаемое значение момента, которое может быть задано непосредственно пользователем или сформировано по алгоритму в режиме управления скоростью; $\omega_d \in \mathbb{R}$ — желаемое значение постоянной скорости вращения ротора, Ψ_k^d — желаемая траектория для амплитуды потока ротора $|\lambda_k|$, q — оператор сдвига $q^{\pm n}[z(k)] = z(k \pm n)$, коэффициенты усиления K_p и K_I соответствуют условию $c > K_p > K_I > 0$, а Ψ_k^d выбирается так, чтобы

$$\frac{|\tau_k^d|}{n_p \Psi_{k+1}^d \Psi_k^d} < \frac{1}{L(1-a)} \quad \forall k \in \mathbb{Z}_+. \quad (17)$$

При этих условиях верны соотношения

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (\omega_k - \omega_d) = 0, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} (|\lambda_k| - \Psi_k^d) = 0. \quad (18)$$

Синтез адаптивных наблюдателей. Используя изложенный в [9] подход, можно синтезировать алгоритм параметризации модели (10)–(12) и получить линейное регрессионное соотношение

$$\zeta_k = \eta^T \Phi_k \quad (19)$$

с вычислимыми по измерениям входного тока $\mathbf{u}_k$ и угловой скорости ω_k последовательностями $\zeta_k \in \mathbb{R}$ и $\Phi_k \in \mathbb{R}^6$ и вектором постоянных параметров

$$\eta = \text{col}(a, \tau_L, (1-a)bc, a^2, a\tau_L, a^2\tau_L) = \text{col}(\eta_1, \dots, \eta_6) \in \mathbb{R}^6. \quad (20)$$

На основе (19) может быть сформирован алгоритм оценивания параметров $\hat{\eta}$ с использованием одного из общеизвестных подходов: метода наименьших квадратов или градиентного спуска [10], динамического расширения и смешивания регрессора (DREM) [11, 12].

Метод DREM позволяет оценивать параметры регрессионных моделей при ослабленных требованиях к условиям возбуждения регрессора, при этом оценки сходятся к истинным значениям за регулируемое время без колебаний в переходном процессе. Другое достоинство метода — возможность оценивать только часть параметров регрессионной модели независимо друг от друга. Суть метода заключается в формировании такой системы регрессионных уравнений, чтобы их количество было не меньше размерности вектора искомых параметров. Каждое новое регрессионное уравнение получается из исходного, например (19), с помощью линейного динамического оператора (блока запаздывания или фильтра).

Выбрав векторный оператор $\mathcal{H}(q)[\cdot] = \mu_k \text{col}(1, q^{-1}, \dots, q^{-5})[\cdot]$ с некоторым коэффициентом $\mu_k \in \mathbb{R}_+$, можно получить матричное регрессионное уравнение вида

$$\mathbf{Z}_k = \eta^T \Phi_k, \quad (21)$$

где $\mathbf{Z}_k = \mathcal{H}(q)[\zeta_k] \in \mathbb{R}^6$, $\Phi_k = \mathcal{H}(q)[\Phi_k^T] \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$.

С использованием операторов Крамера матричное регрессионное уравнение (21) может быть легко декомпозировано на систему из шести скалярных регрессионных уравнений

$$\mathbf{y}_k = \eta \Delta_k, \quad (22)$$

где $\mathbf{y}_k = \text{adj}\{\Phi_k\} \mathbf{Z}_k \in \mathbb{R}^6$, $\Delta_k = \det\{\Phi_k\} \in \mathbb{R}$.

Алгоритм оценивания первых трех компонент вектора $\boldsymbol{\eta}$ имеет вид

$$\hat{\eta}_k^i = \hat{\eta}_{k-1}^i + [\mathbf{y}_k^i - \Delta_k \hat{\eta}_{k-1}^i], i = 1, 2, 3, \quad (23)$$

с некоторой положительной константой γ .

Значения неизвестных параметров R и L могут быть найдены из соотношений, полученных из (20), и функций $a = e^{-\frac{R}{L}T}$, $b = \frac{n_p}{L}$, $c = \frac{(1-a)L}{DR}$:

$$\hat{R}_k = \frac{n_p(1 - \hat{\eta}_{1k})^2}{D\hat{\eta}_{3k}}, \hat{L}_k = -\frac{n_p(1 - \hat{\eta}_{1k})T}{\ln(\hat{\eta}_{1k})D\hat{\eta}_{1k}}, \hat{\tau}_{Lk} = \hat{\eta}_{2k}. \quad (24)$$

Алгоритм адаптивного управления асинхронным двигателем. Алгоритм адаптивного непрямого полеориентированного управления может быть получен путем подстановки оценок $\boldsymbol{\eta}$ в алгоритм непрямого полеориентированного управления (13)–(16), в результате имеем

$$\mathbf{u}_k = e^{\mathbf{J}p_k} \begin{pmatrix} \frac{\Psi_{k+1}^d \cos \beta_k - \hat{\eta}_{1k} \Psi_k^d}{1 - \hat{\eta}_{1k}} \\ \frac{\hat{L}}{\Psi_k^d n_p} \tau_k^d \end{pmatrix}, \quad (25)$$

$$\beta_k = \arcsin \left(\frac{\hat{L}_k(1 - \hat{\eta}_{1k})}{n_p \Psi_{k+1}^d \Psi_k^d} \tau_k^d \right). \quad (26)$$

Алгоритм (25), (26) обеспечивает асимптотическую сходимость вектора магнитного поля к заданному и слежение за произвольно заданным крутящим моментом:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (|\lambda_k| - \Psi_k^d) = 0, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} (\tau_k - \tau_k^d) = 0, \quad (27)$$

а вместе с (16) алгоритм (25), (26) гарантирует слежение за заданной постоянной скоростью с выполнением условия

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (\omega_k - \omega_d) = 0. \quad (28)$$

Заметим, что выполнение условий (27) и (28) достигается без использования датчиков потокосцепления и крутящего момента.

В более общем виде изложенный подход может быть представлен как структурная схема (рис. 1).

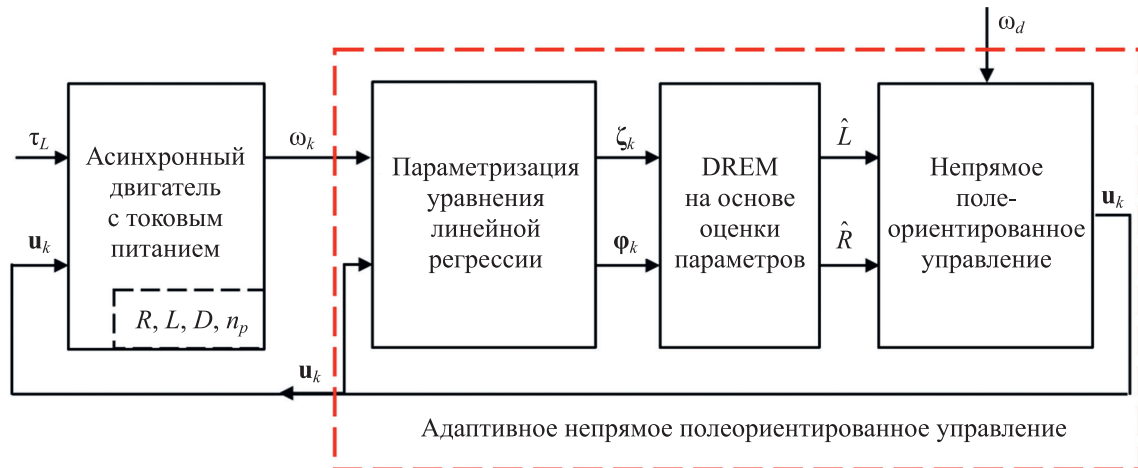


Рис. 1

Заметим, что закон управления (16), (25), (26) позволяет определить номинальное управление для модели двигателя во вращающейся системе координат. Для получения физически реализуемого управления необходимо выполнить следующие вычисления:

$$(\mathbf{i}_{\alpha\beta}^*)_k = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(n_p\theta) & -\sin(n_p\theta) \\ \sin(n_p\theta) & \cos(n_p\theta) \end{bmatrix} \mathbf{u}_k, \quad (29)$$

$$(\mathbf{v}_{\alpha\beta})_k = \frac{1}{\epsilon} \left((\mathbf{i}_{\alpha\beta}^*)_k - (\mathbf{i}_{\alpha\beta})_k \right). \quad (30)$$

Применив обратное преобразование Кларк к сигналам напряжения (30), можно получить выражение для физически реализуемого напряжения питания обмоток статора асинхронной машины.

Система бездатчикового управления асинхронным двигателем. Частотно-регулируемую систему управления трехфазным электродвигателем переменного тока можно представить в виде функциональной схемы (рис. 2), где 1 — источник питания, 2 — выпрямитель, 3 — фильтр, 4 — инвертор, 5 — система управления, 6 — блок координатных преобразований, M — электродвигатель.

Функциональное назначение выпрямителя 2 — преобразование синусоидального напряжения в постоянное. Инвертор 4 содержит полупроводниковые элементы, работающие в ключевом режиме, и блок широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Его функциональное назначение — формирование управляющего воздействия, которое используется для питания электродвигателя. Система управления 5 содержит регуляторы d и q составляющих силы тока, а также регуляторы скорости вращения и угла поворота ротора, в качестве желаемых значений выступают угловое положение ротора θ_d , скорость вращения ротора ω_d и электромагнитный момент двигателя τ_d . Блок координатных преобразований 6 реализует преобразования Кларк и Парка из вращающейся системы координат dq в неподвижную abc на основе данных блока оценивания, который формирует сигнал оценки углового положения $\hat{\theta}$ и скорости вращения ротора $\hat{\omega}$, используя измеренные мгновенные значения электрических переменных ($\mathbf{u}_{abc}$, $\mathbf{i}_{abc}$) и/или механических величин (θ , ω , τ).

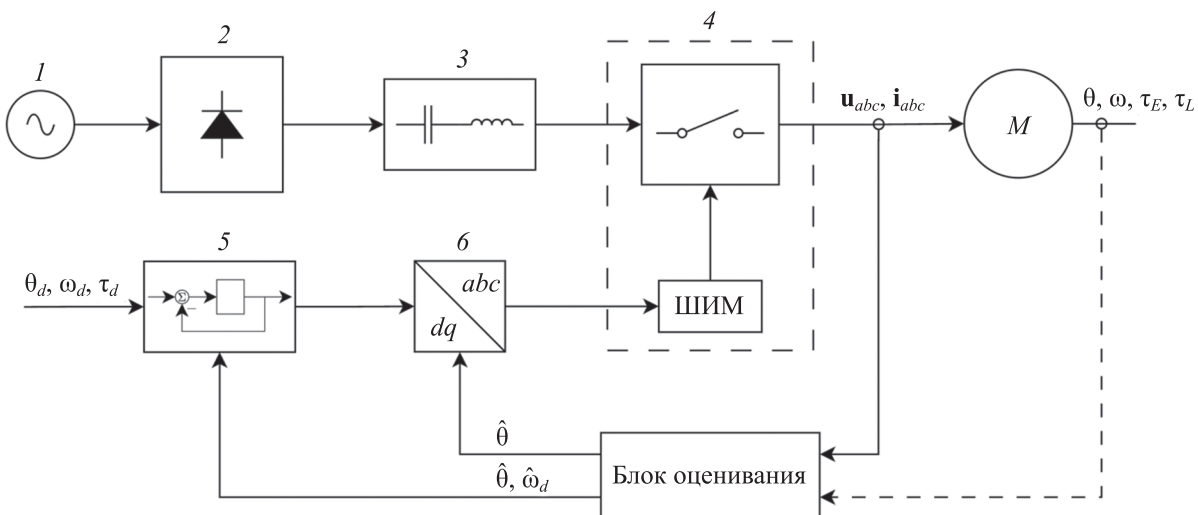


Рис. 2

Заметим, что оценка скорости вращения ротора $\hat{\omega}$ может быть получена на основе электрических сигналов ($\mathbf{u}_{abc}$, $\mathbf{i}_{abc}$), как показано в [13, 14], при этом скорость может быть оценена при произвольном питающем напряжении, достаточно лишь измерять напряжения и токи в обмотках статора. Оценить угловое положение можно путем интегрирования оценки скорости:

$\hat{\theta} = \hat{\omega}$. Оценка углового положения не будет асимптотически стремиться к истинному значению, поскольку интеграл от ошибки оценивания скорости вероятно даст постоянную ошибку в установившемся режиме. Тем не менее можно использовать эту оценку угла в преобразованиях (6) и (29). В этом случае после переходного процесса алгоритма оценивания скорости $\hat{\omega}$ будет также справедлива модель (7)–(9) и все последующие вычисления. Таким образом, блок оценивания может содержать только данные об электрических сигналах, а датчики механических переменных состояния могут не использоваться в системе управления.

Заключение. Рассмотрены математические модели асинхронного электродвигателя. На базе точной дискретной модели во вращающейся системе координат, связанной с ротором, синтезированы алгоритм адаптивного непрямого полеориентированного управления, гарантирующий точное оценивание неизвестных сопротивления и индуктивности ротора и момента нагрузки в предположении, что они постоянны, а также асимптотическое слежение за заданным моментом нагрузки или заданной скоростью вращения ротора. Показано, что, используя алгоритм оценивания скорости вращения ротора методом, изложенным в [13, 14], возможно реализовать бездатчиковое управление по механическим переменным (без использования датчиков положения угла и скорости вращения ротора). Анализ устойчивости такого комбинированного управления с адаптивным наблюдателем угловой скорости по измерениям только токов и напряжений на обмотках статора требует отдельного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leonhard W. Control of Electrical Drives. Springer Science & Business Media, 2001.
2. Nam K. H. AC Motor Control and Electric Vehicle Applications. CRC Press, 2010.
3. Ortega R., Loria A., Nicklasson P. J., Sira-Ramirez H. Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems: Mechanical, Electrical and Electromechanical Applications. London: Springer, 1998. P. 15–37.
4. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die TRANSVEKTOR-Regelung von Asynchronmaschinen. Siemens Zeitschrift, 1971. Pg. 757.
5. Hasse K. Zur Dynamik drehzahl geregelter Antriebe mit stromrichter gespeisten Asynchron-Kurzschlusslaufermaschinen: Extended abstracts of PhD Thesis. Darmstadt, 1969.
6. Espinosa-Pérez G., Ortega R., Nicklasson P. J. Torque and flux tracking of induction motors // Intern. Journal of Robust and Nonlinear Control. 1997. Vol. 7, N 1. P. 1–9.
7. Ortega R., Taoutaou D. On discrete-time control of current-fed induction motors // Systems & Control Letters. 1996. Vol. 28, N 3. P. 123–128.
8. Пыркин А. А., Та М. Ш., Нгуен К. К. Адаптивное управление по выходу асинхронным двигателем на основе динамического регулятора // XIV Всерос. совещ. по проблемам управления (ВСПУ). 2024.
9. Pyrkina A. A., Ta M. S., Nguyen Q. C., Sinetova M. M.. Adaptive observer design for time-varying systems with relaxed excitation conditions // IFAC PapersOnline. 2022. P. 312–317.
10. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991.
11. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkina A. Performance Enhancement of Parameter Estimators via Dynamic Regressor Extension and Mixing // IEEE Trans. on Automatic Control. 2016. Vol. 62, N 7. P. 3546–3550.
12. Ortega R., Aranovskiy S., Pyrkina A. A., Astolfi A., Bobtsov A. A. New results on parameter estimation via dynamic regressor extension and mixing: Continuous and discrete-time cases // IEEE Trans. on Automatic Control. 2020. Vol. 66, N 5. P. 2265–2272.
13. Pyrkina A., Bobtsov A., Vedyakov A., Ortega R., Vedyakova A., Sinetova M. A flux and speed observer for induction motors with unknown rotor resistance and load torque and no persistent excitation requirement // Intern. Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2021. Vol. 35, N 8. P. 1578–1593.
14. Нгуен К. К. Применение метода drembao для наблюдателя магнитного потока и скорости вращения ротора асинхронного двигателя // Материалы XXV Юбилейной конф. молодых ученых „Навигация и управление движением“. СПб, 2003. С. 159–162.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Куанг Кыонг Нгуен

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

Антон Александрович Пыркин

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: pyrkin@itmo.ru

Антон Кириллович Голубев

— аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; ассистент; E-mail: akgolubev@itmo.ru

Поступила в редакцию 15.04.2024; одобрена после рецензирования 18.04.2024; принята к публикации 16.05.2024.

REFERENCES

1. Leonhard W. *Control of electrical drives*, Springer Science & Business Media, 2001.
2. Nam K.H. *AC Motor control and electric vehicle applications*, CRC Press, 2010.
3. Ortega R., Loria A., Nicklasson P.J., Sira-Ramirez H. *Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems: Mechanical, Electrical and Electromechanical Applications*, Springer London, 1998, pp. 15–37.
4. Blaschke F. *Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die TRANSVEKTOR-Regelung von Asynchronmaschinen*, Siemens Zeitschrift, 1971, 757 p.
5. Hasse K. *Zur Dynamik drehzahl geregelter Antriebe mit stromrichter gespeisten Asynchron-Kurzschlusslaufermaschinen*, Diss, TH Darmstadt, 1969.
6. Espinosa-Pérez G., Ortega R., Nicklasson P.J. *Intern. J. of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal*, 1997, no. 1(7), pp. 1–9.
7. Ortega R. and Taoutaou D. *Systems & Control Letters*, 1996, no. 3(28), pp. 123–128.
8. Pyrkin A.A., Ta M.S., Nguyen Q.C. *IV Vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya* (IV All-Russian Meeting on Problems of Management), 2024. (in Russ.)
9. Pyrkin A. A., Ta M.S., Nguyen, Q.C., Sinetova M.M. *IFAC PapersOnline*, 2022, pp. 312–317.
10. Ljung L. *System Identification, Theory for the User*, NJ, PTR Prentice Hall, 1987.
11. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. *IEEE Trans. Automat. Control*, 2016, no. 7(62), pp. 3546–3550.
12. Ortega R., Aranovskiy S., Pyrkin A.A., Astolfi A., Bobtsov A.A. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, no. 5(66), pp. 2265–2272.
13. Pyrkin A., Bobtsov A., Vedyakov A., Ortega R., Vediakova A., Sinetova M. *Intern. J. of Adaptive Control and Signal Processing*, 2021, no. 8(35), pp. 1578–1593.
14. Nguyen Q.C. *Materialy XXV Yubileynoy konferentsii molodykh uchenykh "Navigatsiya i upravleniye dvizheniyem"* (Proceedings of the XXV Anniversary Conference of Young Scientists "Navigation and Traffic Control"), 2023, pp. 159–162. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

Quang Cuong Nguyen

— Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: quangcuonghvhq.cd@gmail.com

Anton A. Pyrkin

— Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: pyrkin@itmo.ru

Anton K. Golubev

— Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Assistant; E-mail: akgolubev@itmo.ru

Received 15.04.2024; approved after reviewing 18.04.2024; accepted for publication 16.05.2024

**РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА
ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ
НА ОСНОВЕ МЕТОДА МИНИМАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИИ**

О. А. Морозов, Е. М. Сорохтин, М. М. Сорохтин*

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
Нижегород, Россия*

* *mikl@nifti.unn.ru*

Аннотация. Рассматривается аппаратная реализация метода обработки фазо- и частотно-манипулированных сигналов, базирующегося на применении алгоритма двухступенчатой нелинейной цифровой фильтрации. Нелинейный фильтр основан на модификации метода минимальной дисперсии Кейпона. Представлено математическое описание алгоритмов совместного функционирования ступеней фильтра. Алгоритм аппаратно реализован в виде автономного устройства со встроенной вычислительной системой на программируемых логических интегральных схемах.

Ключевые слова: демодуляция, встраиваемая реализация, ПЛИС, метод минимальной дисперсии Кейпона, фазовая манипуляция, частотная манипуляция

Ссылка для цитирования: Морозов О. А., Сорохтин Е. М., Сорохтин М. М. Реализация алгоритма двухступенчатой нелинейной цифровой фильтрации сигналов на основе метода минимальной дисперсии // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 7. С. 559–566. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-559-566

**IMPLEMENTATION OF A TWO-STAGE NONLINEAR DIGITAL FILTERING ALGORITHM
BASED ON THE MINIMUM-VARIANCE METHOD**

O. A. Morozov, E. M. Sorokhtin, M. M. Sorokhtin*

Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, Russia

* *mikl@nifti.unn.ru*

Abstract. Hardware implementation of a method for processing phase-shift-keyed and frequency-shift-keyed signals based on two-stage nonlinear digital filtering is presented. The first stage is an informationally optimal linear filter with complex coefficients, the second is a quadratic filter based on the Capon minimum-variance method. The algorithm is implemented in hardware as a stand-alone device with an embedded computing system based on programmable logic integrated circuits.

Keywords: demodulation, embedded implementation, FPGA, Capon's minimum variance method, phase shift keying, frequency shift keying.

For citation: Morozov O. A., Sorokhtin E. M., Sorokhtin M. M. Implementation of a two-stage nonlinear digital filtering algorithm based on the minimum-variance method. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 559–566 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-559-566.

Введение. В современных системах связи и управления при решении большого круга задач широкое применение находят цифровые фильтры. Различные структуры цифровых фильтров наиболее часто используются для решения задач частотной селекции сигналов. Несмотря на множество методов синтеза подобных фильтров для задач предварительной обработки сигналов в ряде специализированных применений в настоящее время активно развиваются методы проектирования сложных многокаскадных фильтров, основанные в том числе на нелинейных и адаптивных алгоритмах [1, 2]. Реализация эффективных алгоритмов нелинейной цифровой фильтрации связана с разработкой подходов, позволяющих учесть различные, часто взаимоисключающие требования к параметрам системы обработки сигналов, в частности требования к быстродействию и помехоустойчивости. В то же время современная элементная база позволяет

реализовать многие сложные алгоритмы цифровой фильтрации и обработки данных в реальном масштабе времени.

В настоящей статье предлагается реализация алгоритма нелинейной цифровой двухступенчатой фильтрации фазо- и частотно-манипулированных (ФМ и ЧМ) сигналов [3] для применения в задачах демодуляции и определения взаимных задержек сигналов в условиях многоканального распространения и неопределенности параметров, например вызванной влиянием эффекта Доплера. Алгоритм основан на выделении информационной (модулирующей) составляющей сигнала за счет нелинейной цифровой фильтрации гармонического заполнения.

Математическая постановка задачи. Метод синтеза рассматриваемого цифрового фильтра подробно описан в [3, 4]. Основой является метод минимальной дисперсии Кейпона, модификация которого позволяет варьировать амплитудно-частотную характеристику фильтра в соответствии с требованиями решаемой задачи. Классический вариант метода минимальной дисперсии Кейпона предусматривает определение коэффициентов линейного фильтра на основе решения задачи минимизации дисперсии выходного сигнала фильтра при условии единичного коэффициента пропускания $H(f_0)$ на заданной частоте f_0 . Вектор коэффициентов фильтра минимальной дисперсии Кейпона с $p + 1$ коэффициентами имеет следующий вид [5, 6]:

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{R}_p^{-1} \mathbf{e}(f_0)}{\mathbf{e}^H(f_0) \mathbf{R}_p^{-1} \mathbf{e}(f_0)}, \quad (1)$$

где $\mathbf{R}_p$ — автокорреляционная $(p + 1) \times (p + 1)$ -матрица входного сигнала, $\mathbf{e}(f)$ — вектор комплексных экспонент.

Выбор значения параметра p , определяющего длину фильтра и, соответственно, порядок матрицы $\mathbf{R}_p$, связан с характеристиками входного сигнала. В частном случае чисто гармонического сигнала достаточно выбрать значение $p = 2$ (с учетом априори неизвестной дисперсии шума — значение $p = 3$). Для более сложных сигналов при оценивании параметра p может использоваться информационный критерий Акаике [5].

При реализации классического метода Кейпона [6] коэффициенты фильтра минимальной дисперсии (1) используются для получения спектральной плотности мощности сигнала с высоким частотным разрешением (спектральная оценка Кейпона). В настоящей работе рассматривается вариант реализации цифрового фильтра, где коэффициенты фильтра минимальной дисперсии, полученные на основе модификации метода Кейпона, используются непосредственно для предварительной обработки отсчетов входного сигнала.

В задачах определения взаимных задержек сигналов космических систем связи изменение несущей частоты, обусловленное в первую очередь влиянием эффекта Доплера, а также другими аппаратными частотными и фазовыми искажениями, приводит к необходимости создания фильтра с определенной частотной характеристикой. Синтез такого цифрового фильтра с использованием метода Кейпона базируется на увеличении значения параметра p выше теоретического предела. Расширение порядка автокорреляционной матрицы сигнала и, соответственно, размера вектора коэффициентов фильтра может быть основано на процедуре разложения матрицы по сингулярным числам. Подбором (варьированием) полученных таким образом дополнительных коэффициентов можно приблизить частотную характеристику фильтра $H(f)$ к требуемой форме:

$$H(f) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \exp(-2\pi i f k).$$

Для получения вектора оптимальных коэффициентов фильтра в условиях недостаточной информации вариационная задача дополняется функционалом информационной энтропии относительно частотной характеристики фильтра в форме Шеннона или Берга:

$$\Phi = -\int |H(f)|^2 \log |H(f)|^2 df, \quad (2)$$

$$\Phi = -\int \log |H(f)|^2 df. \quad (2a)$$

Значения коэффициентов фильтра могут быть получены каким-либо методом многомерной оптимизации функционала информационной энтропии при заданных ограничениях.

На основе линейного фильтра минимальной дисперсии может быть построен нелинейный (квадратичный) фильтр [3, 4]. Выражение для выходных отсчетов квадратичного фильтра $y[n]$, на входной гармонический сигнал $x[n]$ частоты f_0 , имеет следующий вид:

$$y[n] = \frac{\mathbf{x}^T[n] \mathbf{R}_p^{-1} \mathbf{x}[n]}{\mathbf{e}^H(f_0) \mathbf{R}_p^{-1} \mathbf{e}(f_0)} \exp(-2\pi i f_0 n), \quad (3)$$

где n — индекс временного отсчета сигнала; значение параметра p выбирается исходя из требуемой ширины частотного отклика фильтра.

Реализация цифрового фильтра на основе выражения (3) может быть упрощена, так как при неизменных параметрах настройки фильтра можно не учитывать знаменатель, являющийся в данном случае постоянным нормирующим множителем. Выход квадратичного фильтра для случая входного сигнала в виде комплексной синусоиды заданной частоты f_0 в белом шуме представляет собой не зависящую от мощности синусоиды константу [4]. На рис. 1, а представлен отклик нелинейного цифрового фильтра на фазоманипулированный входной сигнал. Величина отклика фильтра на комплексный гармонический сигнал заданной частоты f_0 в промежутках между манипуляциями фазы является практически постоянной и не зависит от амплитуды гармонического заполнения.

Синтез коэффициентов линейного фильтра для обработки ЧМ-сигнала может быть выполнен по аналогии с рассмотренной выше процедурой синтеза фильтра для ФМ-сигнала, при этом ограничения на частотную характеристику задаются в виде коэффициентов пропускания на характерных частотах f_1, f_2 ЧМ-сигнала. Вариацией значений коэффициентов пропускания можно получать различные частотные характеристики при неизменной длине фильтра [3]. Однако для обработки ЧМ-сигналов более эффективным оказывается подход, основанный на использовании двух нелинейных фильтров вида (3), настроенных на разные частоты f_1, f_2 .

Учет фазового множителя $\exp(-2\pi i f_0 n)$ в (3), компенсирующего фазовые сдвиги отсчетов входного сигнала, существенно затрудняет практическую реализацию фильтра, однако отказ от него в случае обработки действительного ФМ- или ЧМ-сигнала существенно снижает помехоустойчивость алгоритмов обработки. Данный эффект связан, в частности, с тем, что величина отклика на фазовый разрыв будет зависеть от места разрыва фазы на периоде несущего колебания. Для устранения влияния этого эффекта в алгоритм обработки вводится дополнительный цифровой фильтр обработки сигнала, предназначенный для перевода действительного входного сигнала в комплексную форму с целью восстановления текущей фазы гармонического колебания [3, 4].

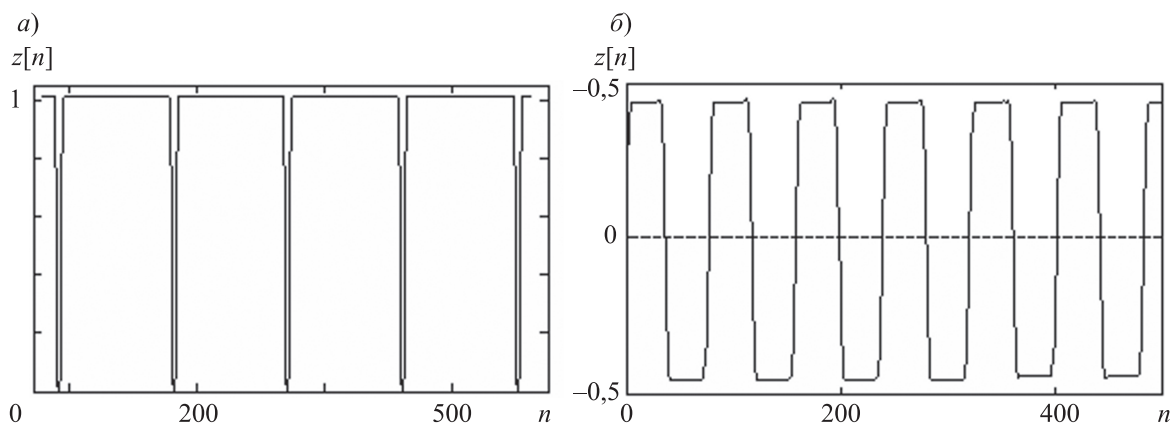


Рис. 1

Таким образом, получаем двухкаскадный цифровой фильтр, первое звено которого представляет собой фильтр с комплексными коэффициентами c_k , восстанавливающий комплексную фазу гармонического сигнала заданной частоты f_0 . Коэффициенты фильтра рассчитываются для определенного значения частоты f_0 с помощью системы линейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=0}^{N-1} c_k \exp(-2\pi i f_0 k) &= \exp(2\pi i f_0), \\ \sum_{k=0}^{N-1} c_k \exp(-2\pi i f_0 k) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Выбор единственного решения для коэффициентов фильтра порядка $N > 2$ осуществляется на основе решения оптимизационной задачи с использованием функционала энтропии в форме Берга (2а). Данный подход позволяет получать частотные характеристики фильтра восстановления фазы со значительно подавленными боковыми лепестками и плоской вершиной главного максимума (рис. 2, а). Для ЧМ-сигнала выбор числа коэффициентов определяется шириной главного максимума, необходимой для пропускания без подавления частот $f_{1,2} = f_0 \pm \Delta f$ сигнала. При этом желателен выбор большой частоты дискретизации с целью по возможности сблизить частоты f_1, f_2 , выраженные в относительных единицах.

Вторым звеном каскада является пара квадратичных фильтров, предназначенных для фильтрации гармонического заполнения сигнала. Каждый из фильтров настроен на соответствующую частоту f_1, f_2 ЧМ-сигнала. Выход квадратичного фильтра на сигнал первого звена каскада (фильтра восстановления комплексной фазы) в каждый момент времени $n\Delta t$ определяется как (без учета нормирующего множителя)

$$\mathbf{z}_n = \mathbf{y}_n \mathbf{R}_p^{-1} \mathbf{y}_p^H. \quad (6)$$

Дальнейшая обработка построена по аналогии со структурой классического частотного детектора — выходные сигналы квадратичных фильтров вычитаются друг из друга, как следствие, частотным компонентам f_1 и f_2 входного сигнала соответствует выходной сигнал фильтра определенного знака. Частотные зависимости откликов квадратичных фильтров $K_2(f, f_0)$, настроенных на разные частоты, приведены на рис. 2, б.

Первое звено каскада, восстанавливающее информацию о комплексной фазе гармонического сигнала, необходимо для стабилизации выхода квадратичных фильтров. Между первым и вторым звеньями каскада предлагается уменьшить частоту дискретизации обрабатываемого сигнала с целью разнести частоты f_1, f_2 по шкале относительных частот и тем самым уменьшить минимально необходимую длину квадратичного фильтра.

Характерный вид выходного сигнала двухкаскадного цифрового фильтра, который можно рассматривать как аналог модулирующей последовательности обрабатываемого ЧМ-сигнала, приведен на рис. 1, б.

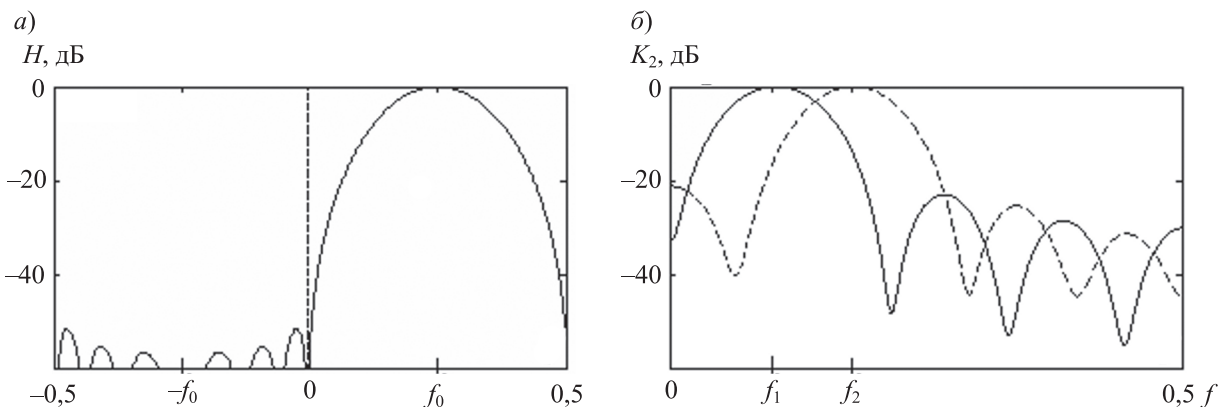


Рис. 2

Реализация. Аппаратная реализация рассмотренного алгоритма обработки сигналов может быть основана на применении встраиваемых вычислительных систем. Реализация на базе встраиваемых микроконтроллеров имеет определенные преимущества, среди которых, в первую очередь, выделяется простота аппаратной системы. В этом случае схема состоит из микроконтроллера (с возможностью выполнения операций с плавающей точкой при необходимости) и блока памяти для хранения команд и данных. Однако применение ресурсов программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и техник построения вычислительных конвейеров позволяет достичь увеличения производительности системы обработки сигналов за счет использования параллельных вычислений и увеличения частоты дискретизации сигнала. Рассмотрим вариант реализации, основанный на применении ПЛИС.

В состав устройства обработки сигналов, реализующего данный алгоритм фильтрации, должны входить следующие ступени (рис. 3):

- фильтр восстановления фазы сигнала, представляющий собой линейный фильтр с комплексными коэффициентами, может быть реализован как пара независимых КИХ-фильтров (по одному для действительной и мнимой частей);

- интерполятор сигналов, предназначенный для передискретизации входного потока отсчетов; изменение частоты дискретизации в общем случае должно проводиться в рациональное число раз, поэтому наиболее простым вариантом реализации является использование каскадных интегрально-гребенчатых фильтров (Cascaded Integral-Comb — CIC) [7];

- квадратичные фильтры, предназначенные для выполнения нелинейной обработки сигнала, реализованные на основе массива линейных фильтров.

В зависимости от модели целевой ПЛИС, требуемых тактовых частот и частот дискретизации могут быть выбраны разные типы реализации фильтров: например, для линейных фильтров — реализации, основанные как на использовании аппаратных умножителей-аккумуляторов (Multiply-ACcumulate — MAC), так и на принципе распределенной арифметики (Distributed Arithmetic — DA) [8]. Актуальность применения последних определяется наличием большого количества логических таблиц перекодировки в современных ПЛИС.

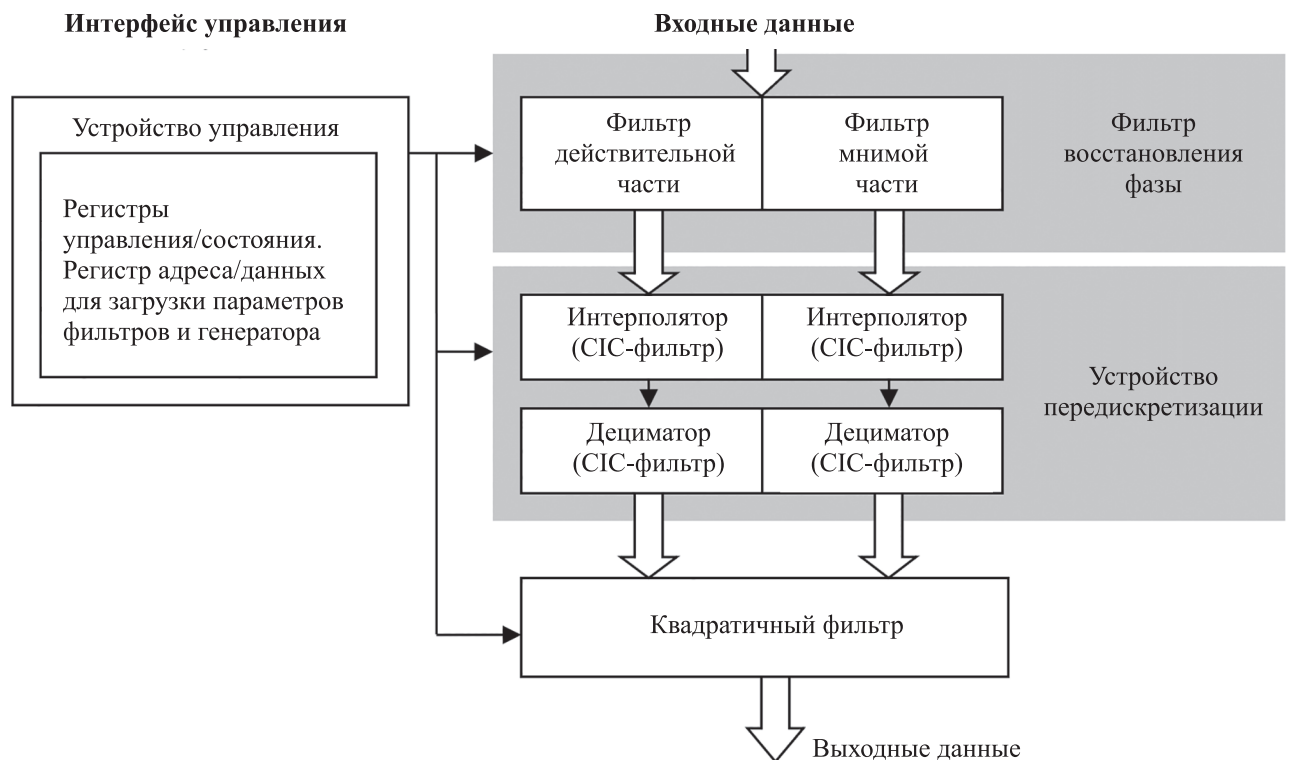


Рис. 3

Передискретизацию предлагается производить с помощью двух каскадов СИС-фильтров, выполняющих интерполяцию с последующей децимацией. Основной трудностью при этом является необходимость обеспечить высокую частоту дискретизации после первого каскада, которая может оказаться в общем случае больше тактовой частоты. В ситуациях, когда тактовая частота не позволяет обеспечить передачу данных между каскадами фильтров, могут быть применены модифицированные звенья СИС-фильтров [7].

Первая ступень обработки наиболее проста. Так как входные данные являются действительными, фильтр с комплексными коэффициентами может быть реализован в виде пары независимых линейных фильтров. Учитывая, что количество коэффициентов фильтра невелико, наиболее экономичной для данного фильтра является реализация, основанная на принципе распределенной арифметики. В случае если режим работы целевого устройства позволяет обеспечить значение тактовой частоты, превышающее частоту дискретизации в K_b раз, где K_b — битовая ширина входных данных, может быть использована более экономичная последовательная реализация распределенной арифметики.

Сигнал с выхода фильтра восстановления фазы поступает на вход устройства передискретизации. В зависимости от деталей реализации системы в целом интерполятор может быть реализован в виде каскадов готовых СИС-фильтров или же в виде устройств, работающих на основе других методов передискретизации, позволяющих снизить тактовые частоты в промежуточных каскадах интерполятора. Однако в случае когда частота дискретизации невелика по сравнению с тактовой частотой, более выгодным является применение двух каскадов СИС-фильтров: интерполятора и дециматора.

После передискретизации данные поступают на вход пары квадратичных фильтров, настроенных на различные частоты. Квадратичный фильтр для $N \times N$ -матрицы M_{ij} реализован на основе массива из N линейных фильтров. Структура реализации квадратичного фильтра приведена на рис. 4.

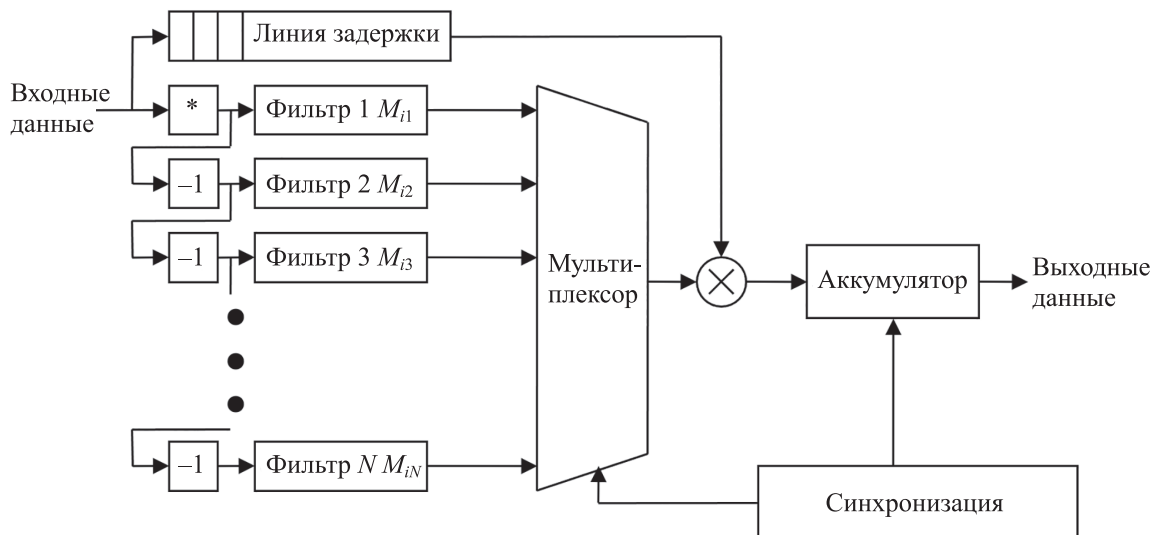


Рис. 4

Входные данные перед поступлением на входы фильтров разветвляются на два канала. В одном канале для данных выполняется комплексное сопряжение, после чего отсчеты сигнала поступают на входы линейных фильтров. Данные другого канала направляются в память линии задержки. На выходах фильтров будут получены суммы

$$\sum x_i M_{ik}, \quad (7)$$

где k — номер фильтра, M_{ik} — набор коэффициентов для фильтра k . Данные с выхода линии задержки поступают на вход умножителя синхронно с выдачей соответствующей суммы

с выхода мультиплексора. Результаты умножения поступают в аккумулятор, вычисляющий сумму

$$\sum \sum x_i^* M_{ik} x_k, \quad (8)$$

соответствующую выходному значению квадратичного фильтра. При этом коэффициенты линейных фильтров должны соответствовать столбцам матрицы коэффициентов квадратичного фильтра.

В случае если размер матрицы коэффициентов (N) квадратичного фильтра невелик, для массива линейных фильтров наиболее выгодно использовать реализацию, основанную на принципе распределенной арифметики [8].

На выход системы обработки сигналов поступают отсчеты разности выходных сигналов двух квадратичных фильтров, настроенных на различные частоты. В целях упрощения аппаратной системы пара квадратичных фильтров и выходной вычитатель могут быть заменены на один квадратичный фильтр с матрицей коэффициентов, равной разности матриц коэффициентов исходных фильтров.

Система обработки сигналов представляет собой конвейер, состоящий из трех ступеней. Каждая ступень выполняет преобразование данных в потоковом режиме, т. е. ступени системы могут одновременно выполнять операции преобразования. При поступлении очередного отсчета входного сигнала x_k первая ступень начинает вычисления для блока данных $[x_{k-K-1} \dots x_k]$. В это время интерполятор будет выполнять операции с блоком данных $[x_{k-K-2} \dots x_k]$. Все блоки устройства объединены конфигурационными интерфейсами, предназначенными для загрузки коэффициентов и задания параметров преобразования.

Важным для данной системы является выбор формата данных. При использовании чисел с фиксированной точкой операции умножения и суммирования имеют наиболее простую реализацию, однако при этом необходимо учитывать расширение шины данных при каждой операции. Расширение шины данных и, возможно, большое количество коэффициентов фильтров может сделать применение принципа распределенной арифметики неэффективным. При таком подходе после каждой ступени конвейера необходимо округлять выходные значения фильтров, что скажется на точности вычислений и приведет к накоплению ошибок.

Заключение. Представлена реализация модифицированного алгоритма нелинейной цифровой фильтрации Кейпона, применяемого для обнаружения и определения параметров распространения фазо- и частотно-манипулированных сигналов в условиях влияния эффекта Доплера. Реализация алгоритма на ПЛИС сочетает гибкость программируемой логики при подстройке параметров работы с высокой производительностью за счет конвейерной обработки отсчетов регистрируемых сигналов вычислительными устройствами в ПЛИС. Предложена схема реализации алгоритма на трехступенчатом конвейере: ступень восстановления фазы, ступень передискретизации и ступень нелинейной предварительной фильтрации сигнала на основе квадратичного фильтра. В реализации может использоваться распределенная арифметика и оптимизированные вычислители на кристалле. Тестирование представленной реализации алгоритма при различных значениях доплеровского смещения центральной частоты показало существенное увеличение вычислительной эффективности по сравнению с компьютерной реализацией алгоритма при сохранении сопоставимой вероятности правильного определения параметров распространения сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб: Питер, 2003. 604 с.
2. Цифровые радиоприемные системы: Справочник / Под ред. М. И. Жодзишского. М.: Радио и связь, 1990. 208 с.
3. Логинов А. А., Морозов О. А., Солдатов Е. А., Хмелев С. Л. Применение цифровой фильтрации на основе модифицированного подхода Кейпона в задаче демодуляции частотно-манипулированных сигналов // Автометрия. 2008. Т. 44, № 3. С. 57–64.

4. *Логинов А. А., Морозов О. А., Солдатов Е. А., Хмелев С. Л.* Комбинированная цифровая фильтрация гармонического заполнения фазоманипулированных сигналов в задаче определения временной задержки // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 3. С. 255–264.
5. *Марпл-мл. С. Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 551 с.
6. *Кейпон Дж.* Пространственно-временной спектральный анализ с высоким разрешением. // ТИИЭР. 1969. Т. 57, № 8. С. 69–79.
7. *Henker M., Hentschel T., Fettweis G.* Time-variant CIC-filters for sample rate conversion with arbitrary rational factors / Dresden Univ. of Technology [Электронный ресурс]: http://www.ifn.et.tu-dresden.de/MNS/veroeffentlichungen/1999/Henker_M_ICECS_99.pdf, 31.05.2010.
8. *White S. A.* Applications of distributed arithmetic to digital signal processing: A tutorial review // IEEE ASSP Magazine. 1989. July.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Олег Александрович Морозов** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, кафедра информационных технологий в физических исследованиях; заведующий кафедрой; E-mail: oa_morozov@nifti.unn.ru
- Евгений Михайлович Сорохтин** — Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Научно-исследовательский физико-технический институт; ведущий инженер; E-mail: eugene@nifti.unn.ru
- Михаил Михайлович Сорохтин** — канд. физ.-мат. наук; Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, кафедра информационных технологий в физических исследованиях; ст. преподаватель; E-mail: mikl@nifti.unn.ru

Поступила в редакцию 12.02.2024; одобрена после рецензирования 12.04.2024; принята к публикации 16.05.2024.

REFERENCES

1. Sergienko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* (Digital Signal Processing), St. Petersburg, 2003, 604 p. (in Russ.)
2. Zhodzishsky M.I., ed., *Tsifrovyye radiopriyemnyye sistemy: Spravochnik* (Digital Radio Receiving Systems: Directory), Moscow, 1990, 208 p. (in Russ.)
3. Loginov A.A., Morozov O.A., Soldatov E.A., Khmelev S.L. *Avtometriya*, 2008, no. 3(44), pp. 57–64. (in Russ.)
4. Loginov A.A., Morozov O.A., Soldatov E.A., Khmelev S.L. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2007, no. 3(50), pp. 235–243.
5. Marple L., Jr., *Digital Spectral Analysis*, Courier Dover Publications, 2019, 432 p.
6. Capon J. *Trudy Instituta inzhenerov po elektrotekhnike i radioelektronike*, 1969, no. 8(57), pp. 69–79. (in Russ.)
7. Henker M., Hentschel T., Fettweis G. *Time-variant CIC-filters for sample rate conversion with arbitrary rational factors*, Dresden University of Technology, http://www.ifn.et.tu-dresden.de/MNS/veroeffentlichungen/1999/Henker_M_ICECS_99.pdf.
8. White S.A. *IEEE ASSP Magazine*, July, 1989.

DATA ON AUTHORS

- Oleg A. Morozov** — Dr. Sci., Professor; Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Department of Information Technologies in Physical Research; Head of the Department; E-mail: oa_morozov@nifti.unn.ru
- Evgeny M. Sorokhtin** — Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Physical-Technical Scientific Research Institute; Leading Engineer; E-mail: eugene@nifti.unn.ru
- Mikhail M. Sorokhtin** — PhD; Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Department of Information Technologies in Physical Research; Senior Lecturer; E-mail: mikl@nifti.unn.ru

Received 12.02.2024; approved after reviewing 12.04.2024; accepted for publication 16.05.2024

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

COMPUTER SIMULATION AND DESIGN AUTOMATION

УДК 538.975

DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-567-573

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ИСТОЧНИКА В ПЛЕНКЕ С НАНОЧАСТИЦАМИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

М. М. Сергеев*, А. Е. Пушкарева, В. Р. Греско

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

* *mmsergeev@itmo.ru*

Аннотация. Представлены результаты применения физико-математической модели, описывающей процессы формирования теплового источника и модификации оптических свойств золь-гель-пленок оксида цинка с наночастицами серебра при воздействии на материал серии ультракоротких лазерных импульсов в режиме накопления тепла. На основании представленных взаимосвязей между режимами лазерного воздействия, оптическими характеристиками пленок и свойствами наночастиц в них показана возможность прогнозирования оптических свойств композиционных материалов.

Ключевые слова: ультракороткие лазерные импульсы, наночастицы, плазмонный резонанс, лазерное облучение

Благодарности: исследования выполнены при финансовой поддержке в форме гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10208).

Ссылка для цитирования: Сергеев М. М., Пушкарева А. Е., Греско В. Р. Моделирование теплового источника в пленке с наночастицами при воздействии ультракоротких лазерных импульсов // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 7. С. 567–573. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-567-573.

MODELING OF A HEAT SOURCE IN A FILM WITH NANOPARTICLES UNDER THE ACTION OF ULTRASHORT LASER PULSES

M. M. Sergeev*, A. E. Pushkareva, V. R. Gresko

ITMO University, St. Petersburg, Russia

* *mmsergeev@itmo.ru*

Abstract. Simulation results describing the heat source formation and optical properties modification of the zinc oxide sol-gel films with silver nanoparticles by the series of ultrashort laser pulses in heat-accumulation mode are demonstrated. Based on presented relationships between laser exposure modes, the optical characteristics of films and the properties of nanoparticles in them, the possibility of predicting the optical properties of the composite materials is shown.

Keywords: ultrashort Laser pulses, nanoparticles, plasmon resonance, laser irradiation

Acknowledgments: the research was carried out with funding from a grant from the Russian Science Foundation (project No. 19-79-10208).

For citation: Sergeev M. M., Pushkareva A. E., Gresko V. R. Modeling of a heat source in a film with nanoparticles under the action of ultrashort laser pulses. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 7. P. 567–573 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-567-573.

Введение. Технология фемтосекундной лазерной обработки материалов активно развивается в настоящее время [1]. Одновременно с этим появляются новые композиционные материалы, имеющие разнообразный состав и оптические свойства [2]. В большинстве случаев такие

материалы состоят из прозрачной матрицы с наночастицами (НЧ) серебра, меди, золота и т. д. За счет НЧ материал приобретает новые оптические свойства, например локальный поверхностный плазмонный резонанс. Такие материалы в виде пленок широко применяются в фотонике, фотовольтаике и сенсорике [3]. Спектральная ширина пика плазмонного резонанса, его интенсивность и положение в спектре напрямую зависят от таких параметров наночастиц, как размер, форма и химический состав. Контролируя эти параметры, можно добиться управления оптическими характеристиками материала. В настоящее время модификация свойств пленок осуществляется путем синтеза и увеличения размера НЧ в процессе тепловой обработки пленок в печи [4], а также с помощью лазерной обработки [5]. Фемтосекундная лазерная обработка композиционных материалов с НЧ широко используется для записи функциональных элементов различного назначения [5]. Однако контроль за изменением оптических характеристик материала в процессе обработки в обоих случаях не применяется. Проблема контролируемой обработки композиционных материалов проявляется в лазерных технологиях, так как при лазерном воздействии происходит нагрев пленки с НЧ и изменение их параметров, что приводит к изменению коэффициента поглощения пленки во время облучения. Это, в свою очередь, изменяет долю поглощенного излучения, что способствует изменению температуры, которая влияет на НЧ.

Один из способов решения данной проблемы — разработка математических моделей, описывающих фототермическую лазерную модификацию НЧ в пленках на основе оптических и теплофизических характеристик композиционных материалов. Такие модели могут применяться для организации систем обратной связи по оптическому отклику отраженного или прошедшего лазерного излучения и экспресс-анализа этих данных в режиме реального времени [6]. В настоящей статье рассматривается вариант применения оптических и теплофизических расчетов для организации обратной связи в технологии лазерного отжига пленок оксида цинка (ZnO), содержащих НЧ серебра (Ag).

Методы и измерения. В исследовании использовались золь-гель-пленки ZnO с содержанием Ag, изготовленные по технологии, описанной в [4]. Пленки толщиной $h_f = 100 \pm 10$ нм представляют собой трехслойную структуру, где нижний и верхний слои — это ZnO, средний слой — НЧ. Размер и объемная концентрация НЧ оценивались по снимкам, полученным сканирующим электронным микроскопом (СЭМ) с учетом того, что электронный пучок просвечивал ZnO-пленки насквозь, достигая подложки и отражаясь на НЧ. По данным СЭМ на поле изображения размером $7,33 \times 5,05$ мкм была оценена объемная концентрация наночастиц $C = 820$ мкм⁻³ и их средний радиус $r = 18 \pm 3$ нм. На рис. 1, а–в представлены СЭМ-снимок пленки ZnO:Ag до облучения, вид снимка с высоким контрастом и гистограмма дисперсии НЧ, на рис. 1, г приведена фотография треков в линейно-поляризованном свете, полученных лазерной записью с плотностью энергии от 65 до 121 мДж/см².

Поглощательная способность пленки A_f определялась двумя способами. В первом случае измерялась мощность падающего $P_{\text{п}}$, отраженного $P_{\text{отр}}$ и прошедшего через образец пленки $P_{\text{пр}}$ лазерного излучения в широком пучке. Для измерений использовался измеритель оптической мощности Gentec с пироэлектрическим детектором UP19K-110F-H9. Затем вычислялись коэффициенты отражения и пропускания пленки: $R_P = P_{\text{отр}}/P_{\text{п}}$ и $T_P = P_{\text{пр}}/P_{\text{п}}$. Во втором случае с помощью спектрометра СФ-56 измерялись спектры пропускания T_C и спектры зеркального R_C и диффузного D_C отражения пленки, после чего выбирались значения на длине волны лазерного излучения. Измерения проводились в абсолютных значениях. Далее оценивалась поглощательная способность пленки по выражениям $A_f = (1 - R_P - T_P)$ и $A_f = (1 - T_C - R_C - D_C)$.

Для моделирования теплового источника использовались следующие режимы фемтосекундного лазерного отжига ZnO:Ag-пленок: длина волны излучения $\lambda = 515$ нм, длительность импульсов $\tau = 224$ фс, частота повторения импульсов $f = 5 \dots 200$ кГц, энергия в импульсе $E_p = 1$ мкДж, диаметр лазерного пятна $d_b = 46$ мкм. Скорость сканирования $v = 1$ мм/с. При данных условиях лазерной обработки происходила модификация структуры и оптических свойств пленки (см. рис. 1, г).

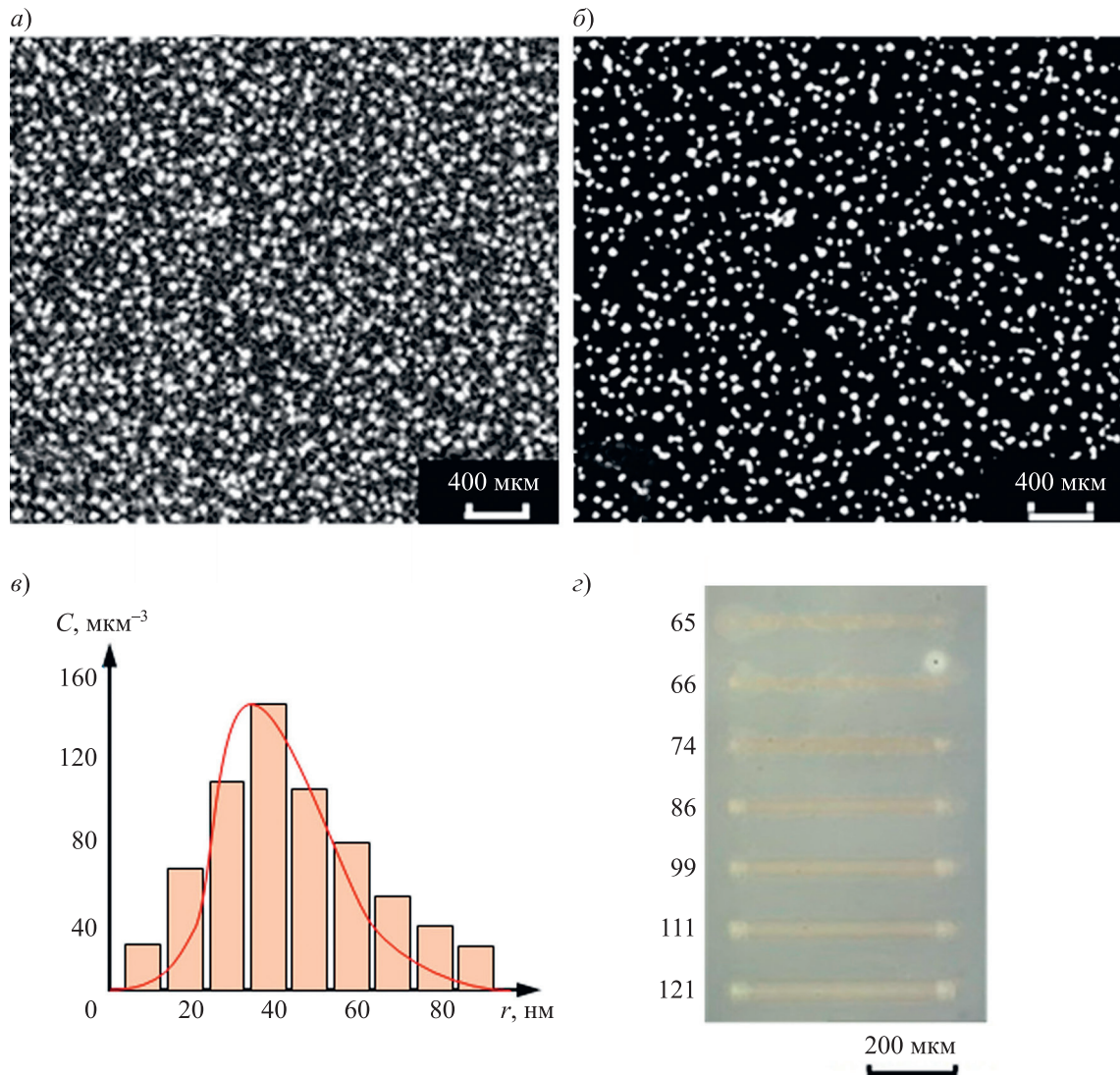


Рис. 1

Описание модели. Тепловой источник формировался в пленке, расположенной на стеклянной подложке, под действием серии ультракоротких лазерных импульсов в области лазерного пятна, движущегося с постоянной скоростью v . При моделировании предполагалось, что НЧ Ag сферической формы равномерно располагались по площади пленки. Это предположение основано на данных СЭМ (см. рис.1, а, б) и условии, что размер лазерного пятна намного превышает размер НЧ. Отношение суммарного объема всех НЧ к объему пленки представляет собой объемную долю второй фазы v_2 , значение которой не превышает нескольких процентов. Объемная доля второй фазы вычислялась по выражению

$$v_2 = \frac{4}{3}\pi r^3 C \quad (1)$$

и до лазерного воздействия равнялась 0,02.

При вычислениях учитывались следующие приближения:

- лазерное излучение поглощалось НЧ Ag в пленке с поглощательной способностью A_f , практически не поглощалось матрицей ZnO и материалом подложки;
- повышение температуры после передачи энергии поглощенного излучения материалу пленки происходило мгновенно, время нагревания не оценивалось;
- теплоотвод от нагретой области пленки происходил в окружающую среду (воздух) и подложку (плавленый кварц) посредством теплопередачи и теплоотдачи на границах, при этом

коэффициент теплоотдачи на границе пленка-воздух составлял 25,15 Вт/м²·К, на границе пленка-подложка — 100,9 Вт/м²·К.

Теплофизические характеристики пленки зависят от концентрации НЧ. Плотность ρ_f и удельная теплоемкость c_f пленки — композиционного материала, состоящего из матрицы ZnO ($\rho_1 = 5700$ кг/м³, $c_1 = 494$ Дж/кг·К) и НЧ Ag ($\rho_2 = 10493$ кг/м³, $c_2 = 235,4$ Дж/кг·К), — вычислялись по следующим выражениям:

$$\rho_f = \rho_1 + v_2(\rho_2 - \rho_1), \quad c_f = \frac{c_1\rho_1 + v_2(c_2\rho_2 - c_1\rho_1)}{\rho_1 + v_2(\rho_2 - \rho_1)}.$$

Теплопроводность пленки k_f вычислялась с учетом $k_1 = 2,28$ Вт/м·К (для ZnO) и $k_2 = 429$ Вт/м·К (для НЧ Ag) согласно выражению [7]

$$k_f = k_1 \left(1 - \frac{v_2}{(1 - k_1/k_2)^{-1} - (1 - v_2)/3} \right).$$

Поглощательная способность пленки A_f также зависит от концентрации наночастиц в ней и их размера. Радиус НЧ влияет на положение пика плазмонного резонанса в спектре, а концентрация НЧ — на интенсивность резонансного поглощения и, следовательно, на величину A_f [8]. Значение A_f вычислялась по выражению

$$A_f = 1 - (1 - R_C)\exp(-h_f\alpha_f) + A_{\text{ZnO}}, \quad (2)$$

где $R_C = 0,038$ — коэффициент зеркального отражения на поверхности пленки; $\alpha_f = (\sigma_a + \sigma_s)C$ — показатель поглощения пленки; σ_a и σ_s — сечения поглощения и рассеяния соответственно. В расчетах использовалось среднее значение A_f , равное 0,55. Также была оценена поглощательная способность пленки без НЧ: $A_{\text{ZnO}} = 0,05$. Полученные данные согласуются с результатами работы [9].

Значения R_C , A_{ZnO} и h_f определялись экспериментально, что позволяло оценить показатель поглощения пленки, используя выражение (2), равный до облучения $\alpha_f = 5,45 \cdot 10^4$ см⁻¹. С другой стороны, значения σ_a и σ_s , связанные с характеристиками НЧ, можно найти в рамках электростатического приближения как [8]

$$\sigma_a = \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im} \left(4\pi r^3 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \right);$$

$$\sigma_s = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} \left| 4\pi r^3 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \right|^2,$$

где ε_1 и ε_2 — диэлектрическая проницаемость матрицы ZnO и НЧ Ag при $\lambda = 515$ нм, рассчитанные с помощью модели ДрUDE — Лоренца.

Распределение температуры в области воздействия оценивалось как мгновенный приток тепла во время импульса и отток тепла между импульсами по каждой координате x, y, z во времени t с помощью модели, предложенной в [10]:

$$T(x, y, z, t) = \frac{A_f E_p}{16c_f \rho_f d_b^2 h_f} \sum_{i=0}^N \left[\left(\text{erfc} \left(\frac{x + ivf^{-1} - 0,5d_b}{2\sqrt{a(if^{-1} + t)}} \right) - \text{erfc} \left(\frac{x + ivf^{-1} + 0,5d_b}{2\sqrt{a(if^{-1} + t)}} \right) \right) \times \right. \\ \times \left(\text{erfc} \left(\frac{y - 0,5d_b}{2\sqrt{a(if^{-1} + t)}} \right) - \text{erfc} \left(\frac{y + 0,5d_b}{2\sqrt{a(if^{-1} + t)}} \right) \right) \times \\ \left. \times \left(\text{erfc} \left(\frac{z - h_f}{2\sqrt{a(if^{-1} + t)}} \right) - \text{erfc} \left(\frac{y + h_f}{2\sqrt{a(if^{-1} + t)}} \right) \right) \right],$$

где N — количество импульсов в серии, a — температуропроводность материала, определяемая в зависимости от теплофизических характеристик среды; температуропроводность a среды, в которой распространялось тепло, задавалась следующим образом:

$$a = \begin{cases} a_{\text{в}}, & z < 0; \\ k_f/(\rho_f c_f), & 0 \leq z \leq h_f; \\ a_{\text{п}}, & z > h_f, \end{cases}$$

где $a_{\text{в}} = 2,11 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $a_{\text{п}} = 5,96 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ — температуропроводность воздуха и подложки соответственно [11].

Обсуждение результатов. С помощью рассмотренной модели экспериментально по данным спектроскопии модифицированных областей и анализа СЭМ-снимков были определены изменения температуры в центре лазерного пятна в точке $(0,0,0)$. С учетом этих данных были рассмотрены четыре варианта изменения A_f и v_2 во время облучения и оценено влияние этих изменений на температуру (рис. 2). При вычислениях рассматривался процесс нагревания пленки под воздействием серии из $N = 500$ импульсов, так как к этому моменту процесс нагревания выходил в стационарный режим и температура практически не изменялась. В первом варианте значения $A_f = 0,55$ и $v_2 = 0,02$ были постоянны, во втором уменьшались линейно, в третьем увеличивались линейно, в четвертом варианте значения менялись скачкообразно после 250-го импульса (рис. 2, б).

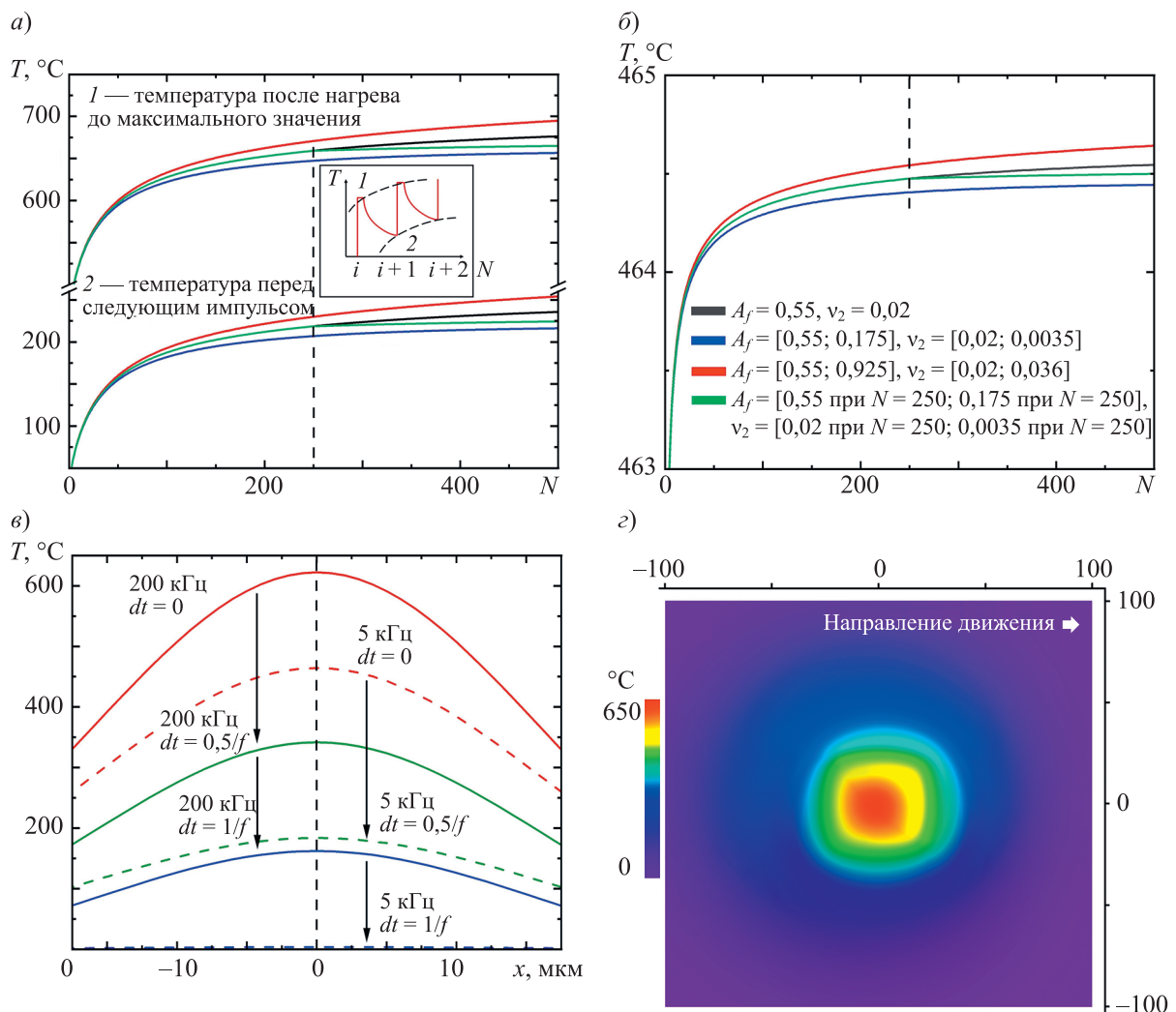


Рис. 2

Анализ рис. 2, а показывает, что процесс нагревания пленки происходил достаточно быстро и к моменту 100-го импульса скорость увеличения температуры начинала замедляться, а после 250-го импульса температура стабилизировалась. Можно отметить, что изменение значений A_f и v_2 не сильно влияло на температуру в центре лазерного пятна, эти изменения после 500-го импульса приводили к изменению температуры в диапазоне 25–50 °С при температуре пленки 650–700 °С. Таким образом, отклонения температуры, связанные с изменением во время облучения поглотительной способности и объемной доли второй фазы в пленке, не превышали 7 % от максимального значения. Тем не менее при скачкообразном изменении значений A_f и v_2 после 250-го импульса происходил мгновенный отклик температуры (рис. 2, а, б, зеленая кривая). Температура начинала снижаться, приближаясь к значениям, соответствующим условиям линейного уменьшения поглотительной способности (рис. 2, а, б, синяя кривая). За время между импульсами при частоте $f = 200$ кГц пленка остывала, и в момент перед следующим 501-м импульсом температура снижалась с 700 до 250 °С, но не остывала полностью (рис. 2, а). Таким образом, пленка оставалась нагретой в момент поглощения каждого следующего импульса и происходило накопление энергии под воздействием серии импульсов. Этот эффект связан с теплофизическими свойствами пленки и частотой следования импульсов. Например, при снижении f с 200 до 5 кГц этот эффект пропадает и температура практически не меняется от импульса к импульсу, начиная с 1-го (рис. 2, б). При этом сохраняются те же закономерности, что и в режиме с $f = 200$ кГц.

Отсутствие эффекта накопления тепла при $f = 5$ кГц приводило к тому, что к каждому следующему импульсу пленка успевала полностью остыть, что видно на профилях температуры вдоль координаты x относительно центра лазерного пятна — см. рис. 2, в, г, где продемонстрирован процесс остывания пленки в различные промежутки времени dt между 100-м и 101-м импульсами, когда режим нагрева приближался к стационарному. Если при $f = 5$ кГц время между импульсами составляло 200 мкс, а величина dt равнялась 0, 100 и 200 мкс, то при частоте $f = 200$ кГц это значение уменьшалось до 5 мкс, а величина dt составляла 0, 2,5 и 5 мкс соответственно. Так, понижая частоту повторения импульсов, экспериментально можно определить время остывания пленки, когда эффект накопления тепла перестает проявляться и температуру пленки невозможно будет зафиксировать приборами, например телевизионной камерой. При частоте $f = 200$ кГц тепло от источника по плоскости XU пленки после 250 импульсов не успевало распространиться далеко за пределы лазерного пятна, тем самым тепловой источник оставался локальным в момент перед следующим импульсом (рис. 2, г).

Заключение. Представленные результаты демонстрируют, что использование переменных значений поглотительной способности пленки A_f и объемной доли второй фазы v_2 приводит к мгновенному изменению температуры в зоне лазерного облучения, а предложенная физико-математическая модель способна описывать изменение температуры при различных значениях A_f и v_2 . Описывающая тепловой источник в пленке теплофизическая модель в сочетании с оптическими характеристиками пленки и параметрами наночастиц в ней позволит в будущем реализовать обратную связь для контролируемой лазерной обработки пленок с наночастицами. Для этой реализации потребуется регистрация коэффициентов пропускания и отражения пленок во время облучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sugioka K. Progress in ultrafast laser processing and future prospects // *Nanophotonics*. 2017. Vol. 6, N 2. P. 393–413.
2. Stalmashonak A., Seifert G., Abdolvand A. Ultra-short pulsed laser engineered metal-glass nanocomposites. Heidelberg: Springer, 2013. 70 p.
3. Unser S., Bruzas I., He J., Sagle L. Localized surface plasmon resonance biosensing: current challenges and approaches // *Sensors*. 2015. Vol. 15, N 7. P. 15684–15716.
4. Shirshneva-Vaschenko E. V., Sokura L. A., Shirshnev P. S., Kirilenko D. A., Snezhnaia Z. G., Bauman D. A., Bougrov V. E., Romanov A. E. Preparation of Transparent N-Zno: Al/P-CuAlCrO₂ Heterojunction Diode by Sol-Gel Technology // *Rev. on Advanced Materials Science*. 2018. Vol. 57, N 2. P. 167–174. DOI: 10.1515/rams-2018-0061.

5. Destouches N., Sharma N., Vangheluwe M., Dalloz N., Vocanson F., Bugnet M., Hébert M., Siegel J. Laser-Empowered Random Metasurfaces for White Light Printed Image Multiplexing // *Advanced Functional Materials*. 2021. Vol. 31, N 18.
6. Sergeev M. M., Zakoldaev R. A., Itina T. E., Varlamov P. V., Kostyuk G. K. Real-Time Analysis of Laser-Induced Plasmon Tuning in Nanoporous Glass Composite // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10, N 6. P. 1131.
7. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Справочная книга. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
8. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 664 с.
9. Sergeev M. M., Gresko V. R., Andreeva Y. M., Sokura L. A., Shirshneva-Vaschenko E. V., Itina T. E., Varygin G. V. Precise laser-induced local modification of AZO:Ag films and their optical properties // *Optics & Laser Technology*. 2022. Vol. 151. P. 108059.
10. Miyamoto I., Horn A., Gottmann J., Wortmann D., Yoshino F. Fusion Welding of Glass Using Femtosecond Laser Pulses with High-repetition Rates // *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*. 2007. Vol. 2, N 1. P. 57–63.
11. Martienssen W., Warlimont H. Springer handbook of condensed matter and materials data. Berlin: Springer Science & Business Media, 2006. P. 1121.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Максим Михайлович Сергеев** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, Институт лазерных технологий; ст. научный сотрудник; E-mail: mmsergeev@itmo.ru
- Александра Евгеньевна Пушкарева** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, Институт лазерных технологий; ст. научный сотрудник; E-mail: aepushkareva@itmo.ru
- Владислав Романович Греско** — аспирант; Университет ИТМО, Институт лазерных технологий; E-mail: gresko.97@mail.ru

Поступила в редакцию 28.03.2024; одобрена после рецензирования 05.04.2024; принята к публикации 16.05.2024.

REFERENCES

1. Sugioka K. *Nanophotonics*, 2017, no. 2(6), pp. 393–413.
2. Stalmashonak A., Seifert G., Abdolvand A. *Ultra-short Pulsed Laser Engineered Metal-Glass Nanocomposites*, Heidelberg: Springer, 2013, 70 p.
3. Unser S., Bruzas I., He J., Sagle L. *Sensors*, 2015, no. 7(15), pp. 15684–15716.
4. Shirshneva-Vaschenko E.V., Sokura L.A., Shirshnev P.S., Kirilenko D.A., Snezhnaia Z.G., Bauman D.A., Bougrov V.E., Romanov A.E. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2018, no. 2(57), pp. 167–174, <https://doi.org/10.1515/rams-2018-0061>.
5. Destouches N., Sharma N., Vangheluwe M., Dalloz N., Vocanson F., Bugnet M., Hébert M., Siegel J. *Advanced Functional Materials*, 2021, no. 18(31).
6. Sergeev M.M., Zakoldaev R.A., Itina T.E., Varlamov P.V., Kostyuk G.K. *Nanomaterials*, 2020, no. 6(10), pp. 1131.
7. Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P. *Teploprovodnost' smesey i kompozitsionnykh materialov* (Thermal Conductivity of Mixtures and Composite Materials), Leningrad, 1974, 264 p. (in Russ.)
8. Bohren C.F., Huffman D.R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Wiley-Verlag, 1983.
9. Sergeev M.M., Gresko V.R., Andreeva Y.M., Sokura L.A., Shirshneva-Vaschenko E.V., Itina T.E., Varygin G.V. *Optics & Laser Technology*, 2022, vol. 151, p. 108059.
10. Miyamoto I., Horn A., Gottmann J., Wortmann D., Yoshino F. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2007, no. 1(2), pp. 57–63.
11. Martienssen W., Warlimont H. *Springer handbook of condensed matter and materials data*, Berlin, Springer Science & Business Media, 2006, 1121 p.

DATA ON AUTHORS

- Maksim M. Sergeev** — PhD; ITMO University, Institute of Laser Technologies; Senior Researcher; E-mail: mmsergeev@itmo.ru
- Alexandra E. Pushkareva** — PhD; ITMO University, Institute of Laser Technologies; Senior Researcher; E-mail: aepushkareva@itmo.ru
- Vladislav R. Gresko** — Post-Graduate Student; ITMO University, Institute of Laser Technologies; E-mail: gresko.97@mail.ru

Received 28.03.2024; approved after reviewing 05.04.2024; accepted for publication 16.05.2024

МОДЕЛЬ СУХОЙ КИСТИ ДЛЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ЖИВОПИСИ

А. И. Каримов*, М. Д. Стрельников, С. В. Мазин, Д. С. Горюнов,
М. В. Кулагин, Т. И. Каримов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова,
Санкт-Петербург, Россия

* aikarimov@etu.ru

Аннотация. Рассматривается одно из направлений компьютерного творчества — робототехническая живопись, объединяющая передовые алгоритмы генерирования изображений с современной мехатроникой. Представлены результаты разработки модели кисти для робота-художника, основанного на коллаборативном роботе Jaka Zu 3. Особое внимание уделяется эффекту сухой кисти — техническому приему, при котором „воздушные“, текстурные мазки наносятся кистью с небольшим количеством краски. Ранее этот прием не использовался в машинной живописи целенаправленно. Описана экспериментальная установка, включающая коллаборативный робот Jaka Zu 3 с кистью, стол, холст, фотоаппарат, а также систему освещения. Введено понятие интегральной плотности мазка, характеризующее количество краски, остающееся на холсте, при исполнении мазка сухой кистью. На основе опытных данных предложена новая математическая модель, позволяющая управлять шириной мазка, оставляемого кистью, и его интегральной плотностью. Полученные результаты могут быть востребованы как при компьютерной имитации живописи, так и в практических реализациях конструкций роботов-художников.

Ключевые слова: робототехника, робототехническая живопись, робот-художник, сухая кисть, Jaka Zu 3

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, соглашение № 22-79-00171.

Ссылка для цитирования: Каримов А. И., Стрельников М. Д., Мазин С. В., Горюнов Д. С., Кулагин М. В., Каримов Т. И. Модель сухой кисти для робототехнической живописи // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 7. С. 574–585. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-574-585.

DRY BRUSH MODEL FOR ROBOTIC PAINTING

A. I. Karimov*, M. D. Strelnikov, S. V. Mazin, D. S. Goryunov, M. V. Kulagin, T. I. Karimov

St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”,
St. Petersburg, Russia

* aikarimov@etu.ru

Abstract: Robotic painting, which combines advanced image generation algorithms with modern mechatronics, is considered as one of the areas of computer creativity. Results of developing a brush model for a robot artist based on the collaborative robot Jaka Zu 3, are presented. Particular attention is paid to the dry brush effect, a technique in which “airy”, textured strokes are applied with a brush containing a small amount of paint. This technique has not been used in machine painting on purpose before. An experimental setup is described, including a collaborative robot Jaka Zu 3 with a brush, a table, a canvas, a camera, and a lighting system. The concept of integral brushstroke density is introduced, which characterizes the amount of paint remaining on the canvas when a brushstroke is applied with a dry brush. Based on the experimental data, a new mathematical model is proposed that allows one to control the width of brushstrokes and their integral density. The obtained results can be used both in computer imitation of painting and in practical implementations of robot artist designs.

Keywords: robotics, robotic painting, robot artist, dry brush, Jaka Zu 3

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, agreement No. 22-79-00171.

For citation: Karimov A. I., Strelnikov M. D., Mazin S. V., Goryunov D. S., Kulagin M. V., Karimov T. I. Dry brush model for robotic painting. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 7. P. 574–585 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-574-585.

Введение. Компьютерное творчество приобретает сегодня все возрастающую значимость в науке и особую популярность в современном искусстве, поднимая основополагающие вопросы о природе искусства и воздействии технологий на творческий процесс. Наиболее известным видом компьютерного творчества является создание изображений по запросам пользователей с помощью генеративных нейронных сетей [1]. Другое, не менее интересное направление компьютерного творчества представлено роботами-художниками, которые, используя традиционные художественные инструменты и материалы, создают физические рисунки и картины с помощью специализированного программного обеспечения [2–4]. Одним из наиболее известных проектов в этой области является робот e-David, разработанный в Констанцском университете (Германия) [5]. Этот робот-художник создает картины с использованием кисти и акриловой краски, внося исправления по ходу работы за счет визуальной обратной связи, реализованной с помощью машинного зрения. Робот Vangobot [6], названный в честь Винсента Ван Гога, стал одной из первых креативных машин, способных смешивать цветные краски. Известен также робототехнический проект CloudPainter, основанный американским художником и робототехником Пиндаром ван Арманом, который для создания художественных произведений использует специально изготовленных роботов и алгоритмы машинного обучения [7]. Эти проекты представляют примеры того, как новые технологии — промышленные роботы, нейронные сети, машинное зрение — внедряются в область искусства, расширяя его границы. Еще одним современным художником, активно применяющим передовые технологии, является Лиат Грайвер, которая сотрудничает с командой разработчиков робота-художника e-David и использует этого робота в своем творчестве [8]. Развитие технологий также подталкивает исследователей к поиску новых способов взаимодействия с роботами-художниками, например посредством танца, движения глаз или с помощью набросков [9–11].

Тематика робототехнической живописи включает в себя большое количество задач, способы решения которых на сегодня уже известны. Так, ряд исследований посвящен адаптации технического и программного обеспечения роботов к работе с определенными художественными инструментами, такими как мастихин [12], губка [11], аэрограф [13]. Большое количество работ затрагивают те или иные аспекты отдельной художественной техники, например каллиграфии [14] или акварели [15], касающиеся реализации работ в этой технике с помощью робота. Отдельной задачей является создание программных и технических средств для точного смешения красок в целях получения произвольного оттенка тона и цвета [16, 17].

В то же время остается и большое количество еще не решенных задач, связанных с моделированием художественной кисти. Существующие системы робототехнической живописи, как правило, используют упрощенные модели кисти, воспроизводящие лишь ее базовые свойства, например зависимость ширины мазка от давления, оказываемого на кисть [18]. Примером технического приема, который остается малоисследованным, является эффект сухой кисти. Этот эффект возникает, когда художник наносит мазки кистью с небольшим количеством краски, из-за чего мазок получается неплотный, выявляющий текстуру холста и нижележащих мазков. Благодаря применению этого приема живописец может лучше контролировать интенсивность цвета и фактуры. Эффект сухой кисти можно видеть в работах таких художников, как Камиль Коро, Эндрю Уайет, Исаак Левитан. На рис. 1 приведена картина „В парке“ И. И. Левитана, 1880 г. Увеличенный фрагмент показывает вблизи, как выглядит текстура, полученная с помощью сухой кисти.



Рис. 1

Необходимо отметить, что сам по себе эффект сухой кисти успешно воспроизводится в системах компьютерной имитации живописи [19–21], но в модели кисти для машинной живописи требуется не просто его воспроизвести, но и предсказать его количественные характеристики, различающиеся от мазка к мазку по мере расхода краски на кисти.

Разработка алгоритмов управления роботом-художником, позволяющих ему воспроизводить фактуру, создаваемую сухой кистью, является сложной научно-инженерной задачей. В настоящей статье предлагается решение этой задачи в два этапа. Первый этап — исследование свойств используемой в эксперименте кисти: определение зависимости ширины мазка от давления на кисть и зависимости плотности текстуры мазка от расхода краски на кисти. Второй этап — создание модели, способной количественно воспроизводить эти характеристики, и обоснование ее применимости в конкретных сценариях использования.

Предлагаемая модель кисти. В процессе живописной работы художник берет кистью краску с палитры и переносит ее на холст касательными движениями. След от кисти на холсте называется мазком. В зависимости от формы кисти и силы нажатия на кисть мазок может иметь разные свойства. В данной работе рассматривается художественная круглая кисть с острым кончиком, обладающая следующим свойством: ширина мазка прямо пропорциональна силе нажатия на кисть. При использовании робота эта сила регулируется смещением точки центра инструмента (ТЦИ) вниз по вертикальной по оси Z . Высококачественные художественные кисти имеют линейную характеристику зависимости ширины мазка от смещения по оси Z [18]:

$$w = k_w Z + w_0, \quad (1)$$

где w — ширина мазка, w_0 — ширина мазка в момент касания холста кистью, k_w — коэффициент линейной аппроксимации.

В зависимости от предварительного увлажнения кисть обладает разной способностью восстанавливать исходную форму после нажатия на нее. Слегка предварительно увлажненная кисть сохраняет эту способность при нанесении до нескольких десятков мазков вне зависимости от вязкости краски, тогда как полностью сухая кисть, загруженная вязкой краской, сразу же теряет свои упругие свойства.

Чем больше мазков делает кисть с момента взятия краски, тем меньше краски остается на кисти. При этом мазок становится все более прозрачным и текстурным. Для описания этих эффектов введем параметр *интегральной плотности* мазка α :

$$\alpha = (\sum_i (c_i - I_i)) / N / (c_0 - I_0),$$

где c_i и I_i — яркости пикселей холста и краски в области, к которой прикасается кисть, c_0 — средняя яркость холста, I_0 — чистый тон краски, N — число пикселей в рассматриваемой области.

Параметр интегральной плотности учитывает как прозрачность краски, нанесенной тонким слоем, так и текстуру: чем более разреженная текстура мазка, тем меньше α .

Рассмотрим физику процесса переноса вязкой краски на холст. В несжимаемой жидкости тензор напряжения сдвига τ и тензор скорости деформации ϵ связаны соотношением [22]

$$\tau = 2\mu(\dot{\gamma})\epsilon,$$

где обобщенная вязкость μ является константой в случае ньютоновской жидкости, а $\dot{\gamma}$ представляет собой первый главный инвариант тензора ϵ [23]; для псевдопластичной жидкости, к которой относится краска, выполняется степенной закон вязкости [24]:

$$\mu(\dot{\gamma}) = K\dot{\gamma}^{n-1},$$

где K — коэффициент густоты потока, n — показатель поведения жидкости, для псевдопластичной жидкости $0 < n < 1$.

Внутреннее устройство кисти целесообразно представить как множество тонких капилляров радиусом r , стенки которых образованы щетинками. В момент касания кистью холста происходит деформация щетины. Это приводит к возникновению градиента давления ∇p_0 , направленного из тела кисти наружу, к пятну контакта. Уравнение Навье — Стокса для малых чисел Рейнольдса в капиллярах можно записать в виде [25]

$$d(\mu(\dot{\gamma})r\dot{\gamma})/dr = r\nabla p_0, \quad (2)$$

где $\dot{\gamma} = du/dr$, а u — скорость течения жидкости в капилляре.

Интегрируя это уравнение по r и принимая во внимание нулевую скорость на границах капилляра, получаем [25]

$$2\mu(\dot{\gamma})\dot{\gamma} = r\nabla p_0. \quad (3)$$

Проинтегрировав уравнение (3) еще раз по r , с учетом степенного закона вязкости получим уравнение

$$dV_b/dt = S(\nabla p_0/(2K))^{1/n} n r^{(n+1)/n} / (n+1),$$

которое описывает производную по времени объема краски V_b , выдавливаемой из кисти, где S — площадь пятна контакта.

При движении кисти по холсту краска частично выдавливается в латеральном направлении, составляя окаймление мазка, большая же ее часть движется слегка впереди кисти в виде вала, в котором создается динамическое давление $p_d = 0,5 \rho v^2$, где ρ — плотность краски, v — скорость движения кисти. Градиент этого давления $\nabla p_d = p_d/d$ определяется через расстояние d между щетиной кисти и холстом в пятне контакта и зависит от локальных особенностей рельефа.

Поскольку в пятне контакта d неоднородно, в расчетах можно использовать усредненное значение $d_{\text{ср}}$. Производная объема краски, задерживающейся на локальных участках холста, равна

$$dV_c/dt = d_{\text{ср}} w (\nabla p_d (2K))^{1/n} n d_{\text{ср}}^{(n+1)/n} / (n+1).$$

Скорость движения кисти и начальный объем краски (V_0) в кисти подбираются таким образом, чтобы выполнялось неравенство $dV_b/dt < dV_c/dt$, т. е. вся выдавленная в определенный момент краска была зафиксирована на холсте. После того как мазок нанесен на холст, внутренний объем капилляров кисти, смоченной ранее краской, уменьшается, что вызывает уменьшение их сечения пропорционально уменьшению объема краски: $r_1 = (V_1/(ML\pi))^{1/2}$, где M — число капилляров, L — длина смоченной краской части кисти. Объем краски, содержащейся в кисти после нанесения одного мазка за время T , равен

$$V_1 = V_0 - \int_T S (\nabla p_0 / (2K))^{1/n} n r_0^{(n+1)/n} / (n+1) dt;$$

$$V_0 = LM\pi r_0^2,$$

где r_0 — радиус капилляра до нанесения мазка.

Зависящими от времени величинами являются S , ∇p_0 , r_0 . В предположении, что в их разложении в ряд Тейлора по времени значимыми являются только первые члены, получим соотношение

$$V_1 = V_0 - bST(\nabla p_0 / (2K))^{1/n} n V_0^{(n+1)/(2n)} (LM\pi)^{-(n+1)/(2n)} / (n+1),$$

где b — коэффициент формы мазка: например, $b = 1$ для прямоугольных мазков, $b = 0,5$ для треугольных мазков и т. п.

Объединив не связанные с V_0 величины в одну константу

$$W = bST(\nabla p_0 / (2K))^{1/n} n (LM\pi)^{-(n+1)/(2n)} / (n+1),$$

получим уравнение

$$V_1 = V_0 - WV_0^{(n+1)/(2n)}.$$

Принимая во внимание связь между площадью мазка s , его толщиной h и объемом краски $V = sh$, а также плотностью мазка $\alpha = k_\alpha h$, где k_α — некоторый коэффициент, получаем

$$\alpha_1 = \alpha_0 - k_\alpha W s^{(1-n)/(2n)} \alpha_0^{(n+1)/(2n)},$$

где α_1 — плотность текущего мазка.

Для одинаковых мазков, нанесенных роботом с одинаковой скоростью, и при прочих равных параметрах, а также при $n \geq 1$ это уравнение дает закон затухания плотности мазка, близкий к линейному. При ньютоновской жидкости ($n = 1$) справедливо точное линейное соотношение

$$\alpha_1 = (1 - k_\alpha W) \alpha_0.$$

Таким образом, интегральная плотность мазка зависит в первую очередь от числа касаний холста кистью и лишь затем от площади, формы и других характеристик ранее нанесенных мазков, поскольку параметр $k = (1 - k_\alpha W)$, который далее будем называть коэффициентом расхода краски, в реальном живописном процессе близок к единице. При $n = 1$ закон изменения плотности мазка можно описать разностным уравнением

$$\alpha[i+1] = k\alpha[i], \quad (4)$$

где i — номер мазка, $\alpha[i]$ — плотность предыдущего мазка, $\alpha[i+1]$ — плотность нового мазка.

Необходимость моделирования мазка с эффектом сухой кисти возникает в двух случаях: при компьютерной имитации живописи и при работе робота-художника, когда необходимо предсказать, какова ожидаемая плотность следующего мазка и нет ли необходимости снова взять краску на кисть. Структурная схема процесса моделирования мазка известной ширины показана на рис. 2. При компьютерной имитации живописи вводится дополнительный этап модификации интегральной плотности случайным образом, к ранее определенному значению добавляется СКО. После определения окончательного значения α предполагается, что из библиотеки мазков (БД) выбирается образец с такой же или близкой плотностью, затем подстраиваются его параметры и мазок выводится для дальнейшей обработки [19].

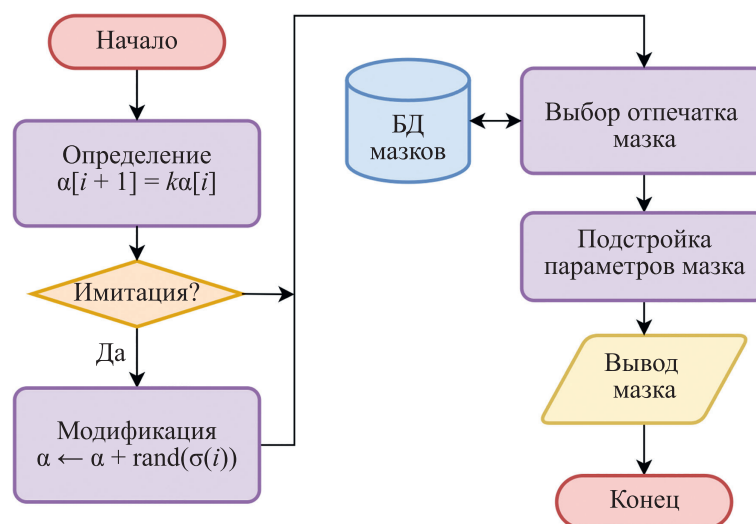


Рис. 2

Для робототехнической живописи необходимым условием получения высокой точности воспроизведения заданного изображения с помощью кисти является визуальная обратная связь. Модель (4) используется на этапе прогнозирования мазка, и после нанесения мазка роботом система визуальной обратной связи оценивает достигнутую погрешность воспроизведения мазка. При необходимости погрешность корректируется новыми мазками, которые наносятся частично или полностью поверх старых. Система обратной связи робота e-David наиболее подробно описана [5]. Этот робот способен не только наносить готовые краски на холст, но и оптически смешивать их за счет нанесения полупрозрачных мазков даже при использовании простейшей модели смешения цветов и без поправки на эффект сухой кисти, предлагаемый в настоящей работе. Использование прогностической модели (4) в аналогичной системе позволит уменьшить число наносимых на холст мазков, сократить время работы робота и снизить расход краски.

Экспериментальная установка. Экспериментальная установка, предназначенная для оценки предложенных моделей, была собрана на базе коллаборативного робота Jaka Zu 3 (рис. 3). Робот был смонтирован на сварочном столе размером 600 × 1200 мм. На столе с помощью специально спроектированных 3D-печатных креплений горизонтально фиксировался холст. Рабочее поле робота Jaka Zu 3 в такой конфигурации составляет 30 × 40 см. В качестве инструмента использовалась кисть Malevich № 6 с синтетическим ворсом, клеенная в съемное крепление, изготовленное методом 3D-печати. Длина всей сборки от верхнего торца крепления до кончика кисти составляла 82 мм. Для нанесения мазков использовалась акриловая краска Sennelier “Campus” кость жженая (пигмент PBk7), разбавленная акриловым медиумом Amsterdam и водой в соотношении 3:1:1.

Файлы с машинными кодами для управления роботом генерировались программой, написанной в среде MatLab, в ней же производилась и обработка результатов экспериментов. Программа управления включала в себя серверную и клиентскую части, которые связывались по протоколу TCP. Серверная часть программы, написанная на языке C# в MS Visual Studio 2022

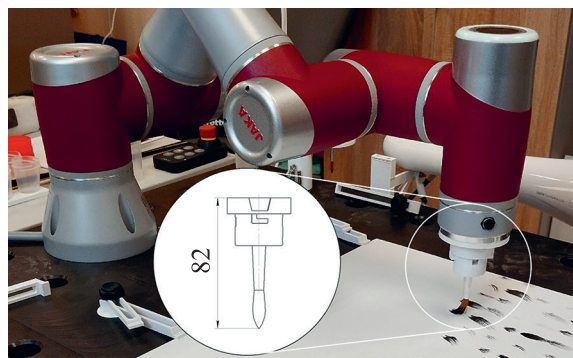


Рис. 3

и запускавшаяся на персональном компьютере с операционной системой Windows 10, отвечала за чтение машинных кодов и вызов необходимых процедур клиентской части. Клиентская часть программы, исполняемая на контроллере робота, была написана на графическом языке программирования в собственной среде разработки компании Яка и отвечала за управление движениями робота.

Для фиксации результатов работы использовался размещенный на высоте 2 м над холстом фотоаппарат Canon M200 с объективом с фокусным расстоянием 50 мм. По сторонам от стола была

смонтирована система студийного освещения, направляющая рассеянный белый свет под углом 45° к поверхности стола для исключения бликов. Максимальное разрешение фотографической системы составило 8,61 пкс/мм. Настройка параметров фотоаппарата и съемка осуществлялись дистанционно с применением программы Canon EOS Utility. Для точного масштабирования уровней яркости рядом с холстом фиксировалась плашка с калибровочными оттенками черного и белого. После съемки динамический диапазон снимка подстраивался таким образом, чтобы калибровочный черный цвет соответствовал уровню „0“, а калибровочный белый цвет — уровню 255 при 8-битном кодировании цветовых каналов.

Результаты. Для получения модели кисти было проведено три эксперимента. Первый эксперимент заключался в нанесении роботом 64 мазков длиной 80 мм при плавном изменении смещения точки центра инструмента по оси Z от 0 до 10 мм. После взятия кистью достаточного количества краски производилось 6 одинаковых мазков, затем кисть тщательно промывалась и просушивалась до состояния легкой увлажненности, чтобы обеспечить сохранение заостренной формы, и цикл повторялся. Измерение ширины мазков осуществлялось по их снимкам, представленным на рис. 4, а, с помощью алгоритма, сканирующего снимок по строкам и определяющего границы области, в которой яркость меньше средней яркости холста s_0 . Полученные графики ширины мазков, линейные аппроксимации зависимости ширины мазка от смещения ТЦИ по оси Z представлены на рис. 4, б. Наибольшая разница визуально и инструментально наблюдается между первыми после взятия краски мазками и последующими. Как показал анализ, коэффициент k_w в линейной аппроксимации (1) слабо зависит от очередности мазков, но начальная ширина w_0 первых мазков в среднем более чем в 1,5 раза больше.

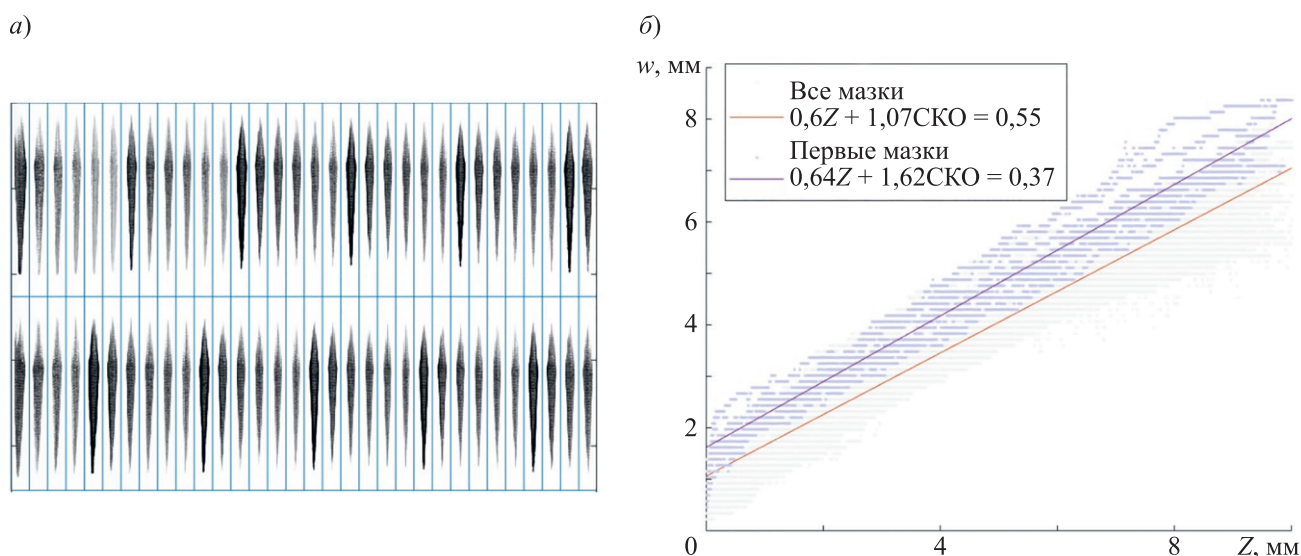


Рис. 4

Полученная оценка k_w по всей выборке равна $0,595 \pm 0,024$ с вероятностью $P = 99,5 \%$, оценка для первых мазков $0,634 \pm 0,03$, $P = 99,5 \%$, что в пределах погрешности совпадает. Оценка w_0 по всей выборке составляет $1,07 \pm 0,16$ мм, $P = 99,5 \%$, оценка для первых мазков — $1,64 \pm 0,19$ мм, $P = 99,5 \%$. Величина СКО линейной оценки (1) составляет для первых мазков 0,37, или 5 % от наибольшего значения w , а для всей совокупности мазков 0,55, или 7 % от наибольшего значения w .

Также было проведено исследование коэффициента расхода краски k по закону (4). Как и в предыдущем случае, зависимость для первых и последующих мазков отличалась. Линейный закон (4) при этом воспроизведен с высокой точностью. С помощью метода наименьших квадратов были найдены следующие значения коэффициента расхода краски: для первых мазков $k_1 = 0,71$, для последующих $k_2 = 0,89$, общий коэффициент по всей выборке $k_{\text{общ}} = 0,81$. СКО линейных аппроксимаций составили соответственно 0,029, 0,013 и 0,043, т. е. не более 5 % от величины $\alpha[i]$. Данные зависимости представлены на рис. 5, а.

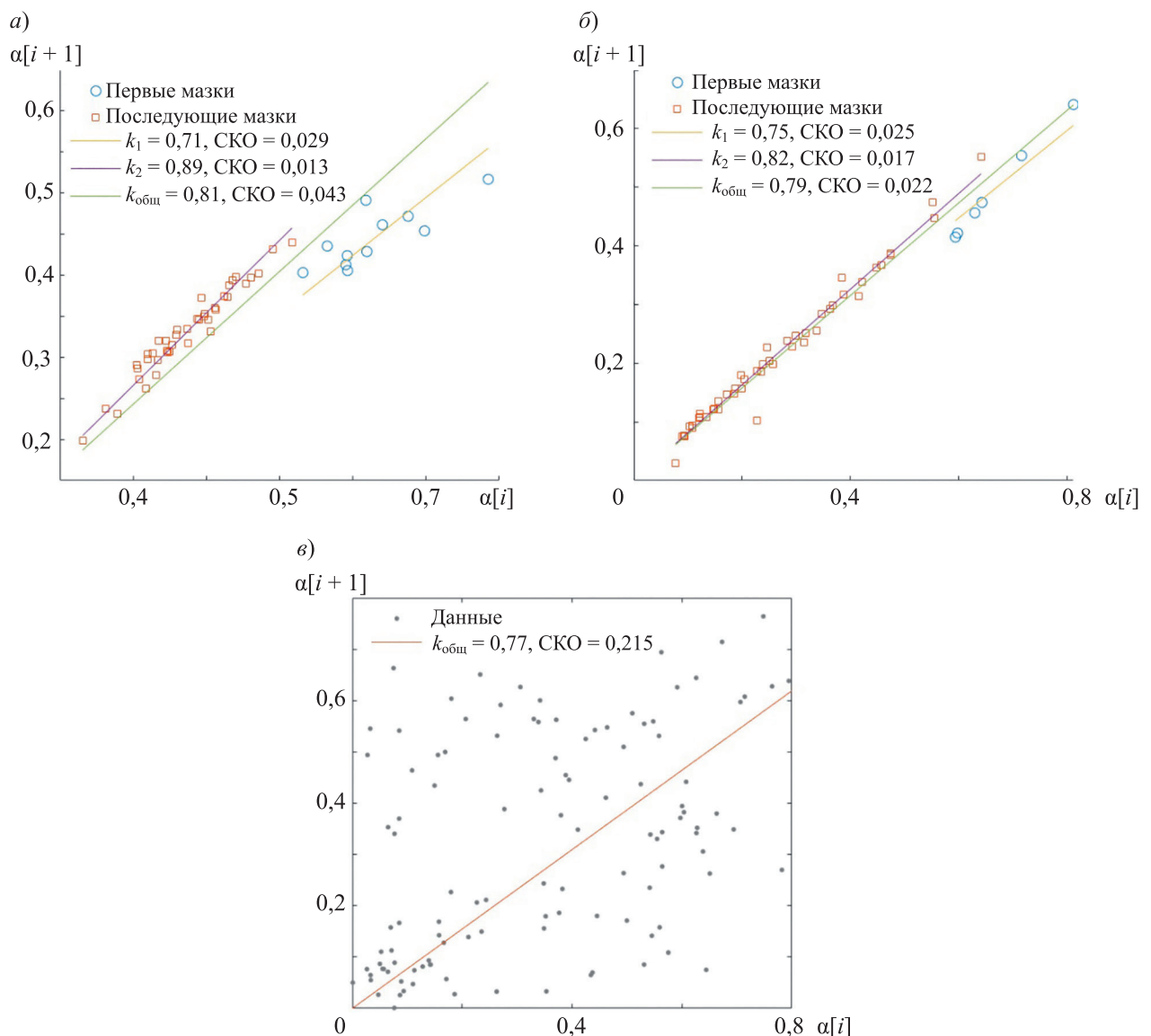


Рис. 5

Второй эксперимент заключался в нанесении роботом 60 мазков постоянной ширины длиной 40 мм с целью оценки влияния формы мазка на закономерности изменения интегральной плотности. Полученные мазки проиллюстрированы на рис. 6. Различия между первыми после

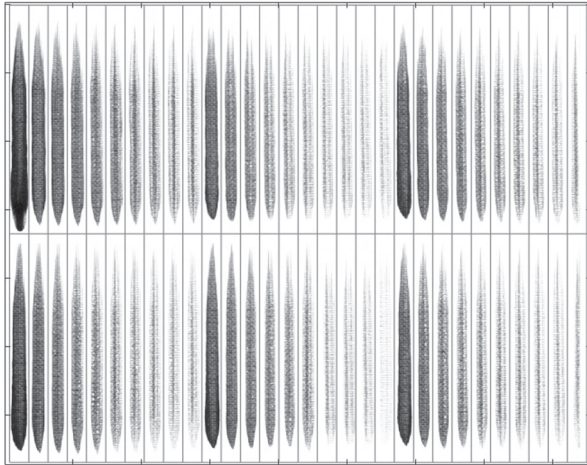


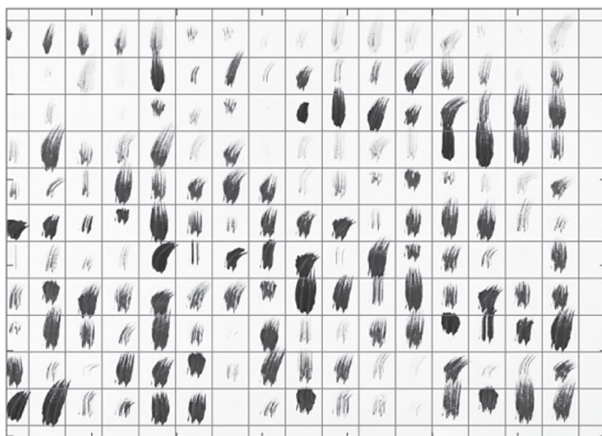
Рис. 6

кисть не сохраняла заостренную форму, мазки получались широкие и текстурные, состоящие из прямых сегментов, число которых варьировалось от 0 до 2. Под мазком, количество сегментов в котором равно нулю, имеется в виду точечный мазок в одно касание холста. К случайным параметрам, изменяющимся в ходе эксперимента, относятся: смещение ТЦИ по оси Z (равномерно распределенная случайная величина от 0 до 10 мм), число сегментов (нуль — с вероятностью 10 %, один — с вероятностью 20 %, два — с вероятностью 70 %), длина мазка (равномерно распределенная случайная величина от 5 до 20 мм), для мазков из двух сегментов — угол между сегментами (равномерно распределенная случайная величина от 9 до 81°) и соотношение длин сегментов (равномерно распределенная случайная величина от 0,2 до 0,8).

Снимок холста с выделенными областями каждого мазка показан на рис. 7, а. Чтобы оценить интегральную плотность, необходимо знать область холста, которую занимает каждый мазок. Для этого использовался подход, проиллюстрированный рис. 7, б. Изображение мазка (шаг 1 на рис. 7, б) размывалось с помощью укрупнения пикселей (шаг 2), а затем все пиксели, яркость которых меньше 255, закрашивались черным, формируя область, которую занимает мазок (шаг 3).

Несмотря на высокий уровень шума в полученных данных, видно (см. рис. 5, в), что и здесь закон затухания интегральной плотности (4) согласуется с экспериментом. Показанная непрерывной линией аппроксимация соответствует уравнению (4) с параметром $k_{\text{общ}} = 0,77$. Значение СКО составило 0,22, т. е. примерно 27 % от наибольшей величины $\alpha[i]$. Такая высокая погрешность обусловлена как особенностями сухой кисти, так и погрешностью определения формы мазка.

а)



б)

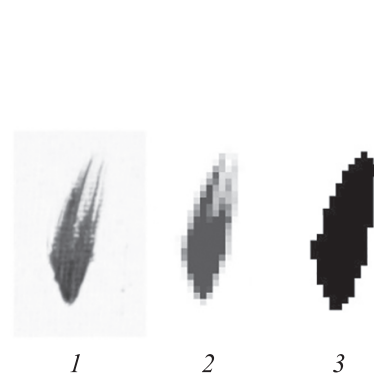


Рис. 7

загрузки краски мазками и последующими оказались менее существенными. С помощью метода наименьших квадратов были найдены следующие значения коэффициента расхода краски: для первых мазков $k_1 = 0,75$, для последующих $k_2 = 0,82$, общий коэффициент по всей выборке $k_{\text{общ}} = 0,79$. СКО линейных аппроксимаций составили соответственно 0,025, 0,017 и 0,022, т. е. не более 3 % от величины $\alpha[i]$. Данные зависимости показаны на рис. 5, б.

Третий эксперимент заключался в нанесении роботом 176 мазков случайной формы, при этом краска на кисти обновлялась только после каждого 20-го мазка. Кисть не промывалась, чтобы исключить смачивание ее водой. Из-за этого

Несмотря на различия значений коэффициента расхода краски, использование $k_{\text{общ}} = 0,8$ дает погрешность менее 10 %, что вполне допустимо в инженерных приложениях, особенно при использовании обратной связи.

Заключение. Представлена математическая модель сухой кисти, предлагаемая для применения в робототехнической живописи. На основе экспериментальных данных получена модель кисти, связывающая ширину мазка со смещением ТЦИ робота по оси Z . Введено понятие интегральной плотности мазка, которое учитывает прозрачность краски и текстуру мазка. На основе уравнений Навье — Стокса выведена зависимость изменения интегральной плотности текущего мазка от количества мазков, сделанных кистью ранее. В дальнейшем представленные модели могут быть полезны для повышения точности и качества роботизированной живописи, а также для достоверной компьютерной имитации живописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oppenlaender J.* The creativity of text-to-image generation // Proc. of the 25th Intern. Academic Mindtrek Conf. 2022. P. 192–202. DOI: 10.1145/3569219.3569352.
2. *Scalera L., Seriani S., Gasparetto A., Gallina P.* A novel robotic system for painting with eyes // Advances in Italian Mechanism Science: Proc. of the 3rd Intern. Conf. of IFToMM Italy 3. 2021. P. 191–199.
3. *Gallina P.* Neural network painting defect classification using Karhunen–Loeve transformation // Optics and Lasers in Engineering. 1999. Vol. 32, N 1. P. 29–40.
4. *Scalera L., Seriani S., Gasparetto A., Gallina P.* Non-photorealistic rendering techniques for artistic robotic painting // Robotics. 2019. Vol. 8, N 1. P. 10.
5. *Lindemeier T., Metzner J., Pollak L., Deussen O.* Hardware-based nonphotorealistic rendering using a painting robot // Comput. Graph. Forum. 2015. N 34 (2). P. 311–323.
6. *Marx D., Vangobot L. K.* CloudPainter [Электронный ресурс]: <http://www.cloudpainter.com/blog/2016/10/19/doug-marx-and-luke-kellys-vangobot>, 08.01.2024.
7. Winner of the 2018 Robot Art prize. Cloudpainter [Электронный ресурс]: <http://www.cloudpainter.com>, 08.01.2024.
8. <https://www.liatgrayver.com/ABOUT/>, 08.01.2024.
9. *Grinberg I. et al.* Implicit collaboration with a drawing machine through dance movements // Proc. of the 8th ACM Symp. on Computational Fabrication. 2023. P. 1–2. DOI: 10.1145/3623263.3629150.
10. *Lin Y. et al.* It is your turn: Collaborative ideation with a co-creative robot through sketch // Proc. of the 2020 CHI Conf. on Human Factors in Computing Systems. 2020. P. 1–14.
11. *Scalera L. et al.* Human–robot interaction through eye tracking for artistic drawing // Robotics. 2021. Vol. 10, N 2. P. 54.
12. *Beltramello A. et al.* Artistic robotic painting using the palette knife technique // Robotics. 2020. Vol. 9, N 1. P. 15.
13. *Scalera L. et al.* Airbrush robotic painting system: Experimental validation of a colour spray model // Advances in Service and Industrial Robotics: Proc. of the 26th Intern. Conf. on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD 2017. Springer International Publ., 2018. P. 549–556.
14. *Sun Y., Xu Y.* A calligraphy robot—Callibot: Design, analysis and applications // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO), IEEE. 2013. P. 185–190.
15. *Scalera L., Seriani S., Gasparetto A., Gallina P.* Watercolour Robotic Painting: a Novel Automatic System for Artistic Rendering // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2018. P. 1–16.
16. *Karimov A. et al.* A Robot for Artistic Painting in Authentic Colors // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2023. Vol. 107, N 3. P. 34.
17. *Karimov A. et al.* Advanced tone rendition technique for a painting robot // Robotics and Autonomous Systems. 2019. Vol. 115. P. 17–27.
18. *Gülzow J. M., Grayver L., Deussen O.* Self-improving robotic brushstroke replication // Arts. MDPI. 2018. Vol. 7, N 4. P. 84.
19. *Zeng K. et al.* From image parsing to painterly rendering // ACM Trans. Graph. 2009. Vol. 29, N 1. P. 2:1–2:11.
20. *Chu N. et al.* Detail-preserving paint modeling for 3D brushes // Proc. of the 8th Intern. Symp. on Non-Photorealistic Animation and Rendering. 2010. P. 27–34.
21. *Guo C. et al.* The simulation of the half-dry stroke based on the force feedback technology // 8th Intern. Conf. on Graphic and Image Processing (ICGIP 2016). SPIE, 2017. Vol. 10225. P. 420–426.

22. Zhao J. et al. An inverse problem for Bingham type fluids // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2022. Vol. 404. P. 113906.
23. Sorbie K. S. *Polymer-Improved Oil Recovery*. Springer Science & Business Media, 2013.
24. Гусев Ю. И., Карасев И. Н., Кольман-Иванов Э. Э. *Конструирование и расчет машин химических производств*. М.: Машиностроение, 1985.
25. Eberhard U. et al. Determination of the effective viscosity of non-Newtonian fluids flowing through porous media // *Frontiers in Physics*. 2019. Vol. 7. P. 71.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- | | |
|--------------------------------------|--|
| Артур Искандарович Каримов | — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент; E-mail: aikarimov@etu.ru |
| Максим Дмитриевич Стрельников | — Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматизированного проектирования; техник; E-mail: maksim_stv@mail.ru |
| Сергей Владимирович Мазин | — Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматизированного проектирования; техник; E-mail: sergei1420011@gmail.com |
| Дмитрий Сергеевич Горюнов | — Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматизированного проектирования; техник; E-mail: mindvorg@gmail.com |
| Максим Вадимович Кулагин | — Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматизированного проектирования; ассистент; E-mail: mvkulagin@etu.ru |
| Тимур Искандарович Каримов | — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент; E-mail: tikarimov@etu.ru |

Поступила в редакцию 06.02.2024; одобрена после рецензирования 28.03.2024; принята к публикации 16.05.2024.

REFERENCES

1. Oppenlaender J. *Proceedings of the 25th International Academic Mindtrek Conference*, 2022, pp. 192–202, DOI: 10.1145/3569219.3569352.
2. Scalera L., Seriani S., Gasparetto A., Gallina P. *Advances in Italian Mechanism Science: Proceedings of the 3rd International Conference of IFTOMM*, Italy, 2021, pp. 191–199.
3. Gallina P. *Optics and Lasers in Engineering*, 1999, no. 1(32), pp. 29–40.
4. Scalera L., Seriani S., Gasparetto A., Gallina P. *Robotics*, 2019, no. 1(8), pp. 10.
5. Lindemeier T., Metzner J., Pollak L., Deussen O. *Comput. Graph. Forum*, 2015, no. 2(34), pp. 311–323.
6. Doug Marx and Luke Kelly's Vangobot, Cloudpainter, <http://www.cloudpainter.com/blog/2016/10/19/doug-marx-and-luke-kellys-vangobot>.
7. Winner of the 2018 Robot Art prize, Cloudpainter, <http://www.cloudpainter.com>.
8. <https://www.liatgrayver.com/ABOUT>.
9. Grinberg I. et al. *Proceedings of the 8th ACM Symposium on Computational Fabrication*, 2023, pp. 1–2, DOI: 10.1145/3623263.3629150.
10. Lin Y. et al. *Proceedings of the 2020 CHI Conference on human factors in computing systems*, 2020, pp. 1–14.
11. Scalera L. et al. *Robotics*, 2021, no. 2(10), pp. 54.
12. Beltramello A. et al. *Robotics*, 2020, no. 1(9), pp. 15.
13. Scalera L. et al. *Advances in Service and Industrial Robotics: Proceedings of the 26th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD 2017*, Springer International Publishing, 2018, pp. 549–556.
14. Sun Y., Xu Y. *2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, IEEE, 2013, pp. 185–190.
15. Scalera L., Seriani S., Gasparetto A., Gallina P. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2018, pp. 1–16.
16. Karimov A. et al. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2023, no. 3(107), pp. 34.
17. Karimov A. et al. *Robotics and Autonomous Systems*, 2019, vol. 115, pp. 17–27.
18. Gülzow J.M., Grayver L., Deussen O. *Arts, MDPI*, 2018, no. 4(7), pp. 84.
19. Zeng K. et al. *ACM Trans. Graph*, 2009, no. 1(29), pp. 2:1–2:11.
20. Chu N. et al. *Proceedings of the 8th International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering*, 2010, pp. 27–34.
21. Guo C. et al. *Eighth International Conference on Graphic and Image Processing (ICGIP 2016)*, SPIE, 2017, vol. 10225, pp. 420–426.

22. Zhao J. et al. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2022, vol. 404, pp. 113906.
23. Sorbie K. S. *Polymer-improved Oil Recovery*, Springer Science & Business Media, 2013.
24. Gusev Yu.I., Karasev I.N., Kolman-Ivanov E.E. *Konstruirovaniye i raschet mashin khimicheskikh proizvodstv (Design and Calculation of Chemical Production Machines)*, Moscow, 1985. (in Russ.)
25. Eberhard U. et al. *Frontiers in Physics*, 2019, vol. 7, pp. 71.

DATA ON AUTHORS

- | | |
|-----------------------------|--|
| Artur I. Karimov | — PhD; St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Department of Computer-Aided Design Systems; Associate Professor; E-mail: aikarimov@etu.ru |
| Maksim D. Strelnikov | — St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Department of Computer-Aided Design Systems; Technician; E-mail: maksim_stv@mail.ru |
| Sergey V. Mazin | — St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Department of Computer-Aided Design Systems; Technician; E-mail: sergei1420011@gmail.com |
| Dmitry S. Goryunov | — St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Department of Computer-Aided Design Systems; Technician; E-mail: mindvorg@gmail.com |
| Maksim V. Kulagin | — St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Department of Computer-Aided Design Systems; Assistant; E-mail: mvkulagin@etu.ru |
| Timur I. Karimov | — PhD; St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Department of Computer-Aided Design Systems; Associate Professor; E-mail: tikarimov@etu.ru |

Received 06.02.2024; approved after reviewing 28.03.2024; accepted for publication 16.05.2024

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

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

УДК 681.2-2,62-293, 53.08, 629.78
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-586-592

ИМИТАТОР ТРАНСПОРТНО-ПУСКОВОГО КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ВИБРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НАНОСПУТНИКОВ СТАНДАРТА CUBESAT 6U

Д. В. Фомин*, А. Е. Голых

Амурский государственный университет, Благовещенск, Россия

** e-office@yandex.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследования спроектированного имитатора транспортно-пускового контейнера для проведения вибродинамических испытаний наноспутников стандарта CubeSat 6U. Частотный анализ устройства проводился в САПР SolidWorks в диапазоне 5–140 Гц; в результате выявлены две резонансные частоты 42,25 и 75,42 Гц в плоскости Z и одна — 42,25 Гц для плоскостей X и Y . Приведены результаты натурных испытаний спроектированного устройства по поиску резонансов путем измерения амплитуд и частот. Установлено, что на всем диапазоне сдвиг частот не превысил 5 %, а наибольший сдвиг амплитуды составил 18 % на частоте 40.2 Гц в плоскости Y . Полученные значения свидетельствуют, что спроектированное устройство может использоваться в качестве оснастки при вибродинамических испытаниях спутников. Расхождение значений резонансных частот, полученных при натурных и модельных испытаниях, не превысило 5 %, что удовлетворяет стандартным требованиям сходимости результатов измерений.

Ключевые слова: *оснастка, собственные частоты, масса нагрузки вибростенда, наноспутник, вибродинамические испытания, деформация*

Ссылка для цитирования: *Фомин Д. В., Голых А. Е. Имитатор транспортно-пускового контейнера для вибродинамических испытаний наноспутников стандарта CubeSat 6U // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 7. С. 586–592. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-586-592.*

SIMULATOR OF A TRANSPORT AND LAUNCH CONTAINER FOR VIBRODYNAMIC TESTS OF CUBESAT 6U STANDARD NANOSATELLITES

D. V. Fomin*, A. E. Golykh

Amur State University, Blagoveshchensk, Russia

** e-office@yandex.ru*

Annotation. Results of a study of a simulator of a transport and launch container designed for conducting vibration-dynamic tests of CubeSat 6U standard nanosatellites are presented. The frequency analysis of the device is carried out in CAD SolidWorks in the range from 5 to 140 Hz. As a result, two resonant frequencies of 42.25; 75.42 Hz in the Z plane and one — 42.25 Hz, for the X and Y planes, are identified. Results of full-scale tests of the designed device for searching resonances by measuring amplitudes and frequencies are presented. It is found that the frequency shift did not exceed 5% over the entire range, and the greatest amplitude shift is 18% at the frequency of 40.2 Hz in the Y plane. The obtained values indicate that the designed device can be used as equipment for vibration-dynamic tests of satellites. The discrepancy between the values of resonance frequencies obtained during full-scale and model tests did not exceed 5%, which satisfies the standard requirements for the convergence of measures.

Keywords: *tooling, natural frequencies, vibration stand load mass, nanosatellite, vibrodynamic tests, deformation*

For citation: Fomin D. V., Golykh A. E. Simulator of a transport and launch container for vibrodynamic tests of CubeSat 6U standard nanosatellites. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 7. P. 586–592 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-586-592.

В современной промышленности вибродинамическое тестирование (ВДИ) сложных технических устройств является неотъемлемой частью процесса контроля и обеспечения качества данных изделий и их функциональных блоков, поскольку при эксплуатации вибрации могут оказывать на них разрушительное воздействие, вызывая износ изделий, поломки или снижение работоспособности. Чтобы гарантировать безопасность и надежность спроектированных конструкций, важно проводить тщательное тестирование на вибрационную нагрузку как отдельных узлов, так и всего устройства в сборе.

Одним из ключевых элементов при проведении такого тестирования являются специальные оснастки, предназначенные для закрепления объектов исследования на столе вибростенда. Эти конструкции должны не только обеспечивать фиксацию объектов, но и сохранять свои механические свойства неизменными под воздействием интенсивных вибрационных нагрузок.

В настоящей статье рассматривается спроектированная в Научно-образовательном центре (НОЦ) им. К. Э. Циолковского Амурского государственного университета (АмГУ) оснастка для малых космических аппаратов (МКА) стандарта CubeSat, используемая при проведении вибродинамических испытаний [1, 2]. Закрепление наноспутников на столе вибростенда осуществляется с помощью специальной оснастки. Для этого, как правило, используют имитаторы транспортно-пусковых контейнеров (ИТПК), которые представляют собой рамные конструкции, имитирующие воздействие реального пускового контейнера на спутник. На данный момент существует несколько типов ИТПК, которые можно разделить на закрепляемые на столе вибростенда и закрепляемые на поворотные основания. Устройства первого типа применяются на вибростендах, создающих вибрацию в трех взаимно ортогональных плоскостях. Такие ИТПК можно использовать и на однонаправленных вибростендах, однако для обеспечения воздействия вибрации на тестируемый спутник в других ортогональных плоскостях необходимо его извлекать из контейнера и поворачивать вручную, причем только на возможные углы 90, 180 и 270°, а затем возвращать обратно в контейнер, прерывая при этом процесс ВДИ. В качестве примера закрепляемых на столе вибростенда ИТПК можно рассмотреть представленные в патентах RU 2758161 C1 и RU 211274 U1. В данных устройствах возможен поворот спутников (в ручном режиме) при тестировании МКА стандарта CubeSat 1U — 3U и 12U, при тестировании спутников стандарта CubeSat 6U в рассматриваемых устройствах — поворот только на угол 180°. Таким образом, тестирование спутников на однокомпонентных вибростендах с применением ИТПК, закрепляемых на столе вибростенда, требует дополнительных временных затрат, при этом поворот МКА внутри ИТПК возможен только вокруг продольной оси на фиксированные углы, а тестирование можно провести только в двух плоскостях [1–3].

Для устранения указанных недостатков следует использовать ИТПК, закрепляемые на поворотных основаниях, которые, в свою очередь, закрепляются на столах однокомпонентных вибростендов. Благодаря этому изменение ориентации наноспутника происходит в трех ортогональных плоскостях относительно стола вибростенда непосредственно на поворотном основании. Данные оснастки сокращают время проведения испытаний, что соответствует ГОСТ 30630.0.0-99, п. 6.9 *.

Таким образом, согласно представленному анализу способов использования ИТПК в составе вибростендов с однонаправленным вибрационным воздействием наибольший интерес представляют последние. Поэтому далее рассмотрим пример реализации конструкций ИТПК, закрепляемых на поворотных основаниях, — одна из них, предназначенная для спутников стандарта CubeSat 1U-3U, представлена на рис. 1 [4].

Спроектированное и изготовленное устройство представляет собой ИТПК с системой балансировки центра масс и полуосями для установки на поворотное основание [4]. Данное устройство прошло апробацию на однокомпонентном вибростенде ВИКАМ 35/14, создающем синусоидальную вибрацию в вертикальной плоскости с перемещением стола до 3 мм (без

* ГОСТ 30630.0.0-99. Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Общие требования. Введ. 01.09.2000.



Рис. 1

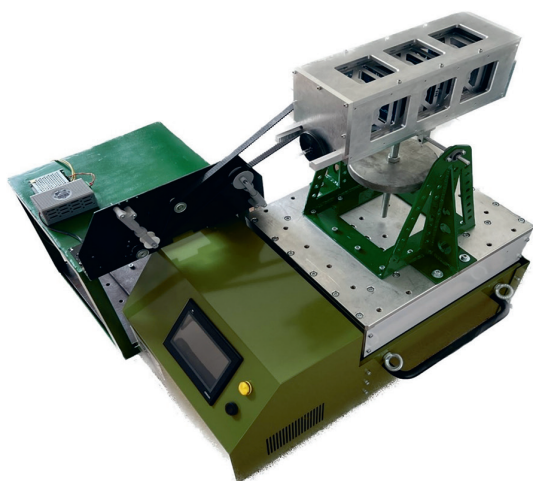


Рис. 2

нагрузки). Максимальная масса нагружения вибростенда составляет 35 кг. К достоинствам данного прибора можно отнести его низкую стоимость и относительную простоту использования [5]. В процессе тестирования наноспутника на вибростенде с применением вышеописанной оснастки поворот ИТПК происходит благодаря наличию полуосей, размещенных под его основанием (оси закрепляются в подшипниках), а крутящий момент передается от шагового двигателя через зубчато-ременную передачу системой натяжителей-успокоителей (рис. 2). Управление самим двигателем осуществляется с помощью микроконтроллера с использованием специально программного обеспечения [2].

Масса рассматриваемого ИТПК вместе с максимально возможной массой спутника стандарта CubeSat 3U (4 кг) составляет 11,44 кг [2]. Масса поворотного основания 4,45 кг, а масса балансиров 5,5 кг. В результате общая масса оснастки со спутником составляет 21,39 кг. Важно отметить, что данное значение находится, согласно паспортным данным вибростенда, в пределах допустимого нагружения для ВИКАМ 35/14, поскольку бесконтрольное увеличение массы исследуемого объекта ведет к снижению значений максимального ускорения вибростола. Таким образом, представленная оснастка позволяет тестировать на указанном оборудовании спутники с массой КА, не превышающей 4 кг, поскольку масса самой оснастки составляет 17,39 кг.

Цель данной работы — проектирование закрепляемого на поворотном основании ИТПК для более тяжелых наноспутников массой до 12 кг (стандарт CubeSat 6U) в отношении однокомпонентного вибростенда ВИКАМ 35/14, исследования по определению резонансных частот и коэффициентов массового уча-

стия спроектированного устройства путем моделирования в САПР SolidWorks, также проведение вибродинамических натурных испытаний спроектированного и изготовленного ИТПК 6U.

При проектировании необходимо было учесть, что суммарная масса нагрузки не должна превышать $2/3$ от максимально возможной массы нагружения рассматриваемого вибростенда (35 кг), так как при превышении этого предела вибростенд не сможет развивать нужное виброускорение. Исходя из вышесказанного при использовании спутника стандарта CubeSat 6U (с максимальной массой 12 кг) требовалось перепроектировать ИТПК (представленный на рис. 1) под ранее разработанное поворотное основание таким образом, чтобы снизить общую массу оснастки, например, путем размещения оси ее вращения в геометрическом центре боковых поверхностей ИТПК с целью исключения ранее использовавшихся массивных балансиров. Также необходимо было дополнить конструкцию ИТПК механизмом точной фиксации положения спутника ввиду изменения принципа балансировки.

Важно отметить, что при проведении натурных виброиспытаний изготовленного ИТПК с целью поиска резонансных частот были учтены критерии и методы, установленные документом Европейского сотрудничества по космической стандартизации наземных испытаний космических аппаратов — стандартом ECSS-E-ST-10-03C, п. 5.5.2.5.

Для вибростенда ВИКАМ 35/14 с максимальной нагрузкой 35 кг в САПР SolidWorks был спроектирован ИТПК для спутников стандарта CubeSat 6U с массой 8,4 кг, закрепляемый на поворотном основании (рис. 3).

ИТПК содержит: съемный механизм синхронизации 1 (см. рис. 4), благодаря которому происходит равномерный зажим спутника ножничными подъемниками 2, обеспечивающими фиксацию и расфиксацию спутника внутри ИТПК; боковые стенки, в геометрических центрах которых расположены фланцы для установки осей вращения 3 — такая конфигурация боковых стенок позволяет исключить массивные балансиры, применявшиеся в предыдущей конструкции (см. рис. 1);двигающуюся каретку 4, которая в спроектированной конструкции используется для балансировки спутника, и, помимо этого, позволяет реализовать функцию безопасной установки и извлечения спутника в/из ИТПК.

Спроектированное устройство поддерживает следующий функционал предыдущей разработки с поворотным основанием: возможность поворота на любой угол в плоскости Y и надежную фиксацию спутника внутри ИТПК. При этом модернизированное устройство позволяет осуществить балансировку спутника внутри контейнера благодаря наличию двигающейся каретки, после чего зафиксировать его с помощью ножничных подъемников и съемного устройства синхронизации.

Анализ массовых характеристик спроектированного устройства показал, что результирующее значение для ИТПК с основанием и спутником внутри составило 20,4 кг. Данная величина получена путем суммирования масс: поворотного основания (4,45 кг), ИТПК (3,95 кг) и максимальной массы спутника стандарта CubeSat 6U (12 кг). Общая рассчитанная масса не превышает максимального нагружения вибростенда ВИКАМ 35/14 (23,33 кг), что позволяет провести натурные вибродинамические испытания для спутника стандарта CubeSat 6U и спутников меньшей массы [6].

Масса спроектированной оснастки для спутников CubeSat 6U благодаря изменениям ее конструкции стала меньше на 4,85 % по сравнению с ИТПК для спутников CubeSat 1U — 3U (см. рис. 1).

После оценки массовых характеристик спроектированного устройства было проведено модельное исследование по определению его собственных частот с малым воздействием $1g$ [7] в программе САПР SolidWorks. Предел для исследования был выбран исходя из значений частот, возникающих при наземной транспортировке (от 5 до 140 Гц согласно ECSS-E-ST-10-03C). В результате исследования были определены две резонансные частоты 42,25 и 75,42 Гц в плоскости Z и одна резонансная частота 42,25 Гц для плоскостей X и Y . Графическая зависимость частоты (f) от действительного коэффициента массового участия (K), полученная в ходе модельных испытаний, представлена на рис. 5 (значения для других частот на графике не показаны, поскольку для них не было обнаружено значительных резонансов).

При моделировании для анализа качества примененной сетки использовался коэффициент Якобиана, при этом для наиболее искаженного элемента сетки он составил 6,95, что говорит о ее высоком качестве (в соответствии с руководством SolidWorks [8]). В результате локализации наибольшая деформация при вибрации была определена в зоне фиксации полуосей на боковых стенках ИТПК. Вид распределения деформаций по ИТПК для спутников стандарта CubeSat 6U показан на рис. 6.

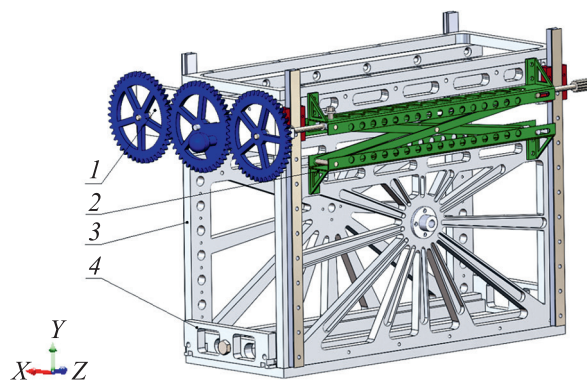


Рис. 3

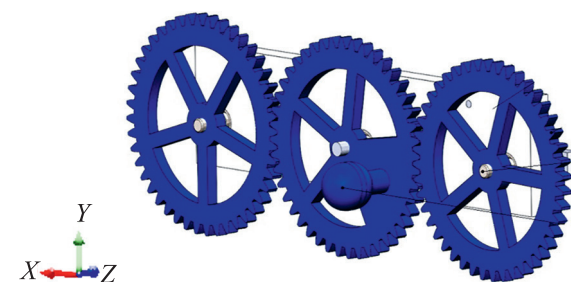


Рис. 4

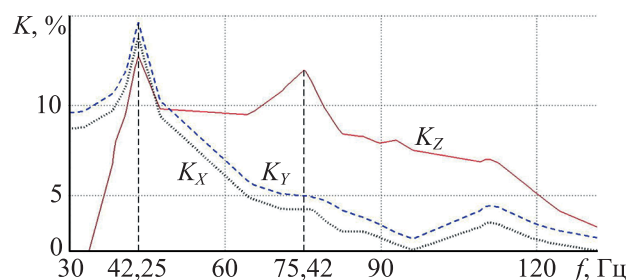


Рис. 5

После моделирования в программе САПР SolidWorks для спроектированного ИТПК с определенными собственными частотами и наиболее деформируемыми областями был изготовлен экспериментальный образец устройства (патент на изобретение № 2812511 от 30.01.2024), который затем прошел натурные испытания. Материалом его основания, стенок и крышки стал алюминий марки АМг2М. Направляющие и фланцы полуосей были распечатаны на 3D-принтере из ABS пластика с заполнением 75 % (материалы изготовленного образца соответствовали модельным). Масса изготовленного образца в сборе составила 20,5 кг. Фото экспериментального образца ИТПК представлено на рис. 7.



Рис. 6

Экспериментальный образец был протестирован на наличие собственных частот на вибростенде ВИКАМ 35/14. Значение спектральной плотности ускорения соответствовало максимальному, возникающему при наземной транспортировке, и составило $0,02 \text{ г}^2/\text{Гц}$. Значение амплитуды при такой спектральной плотности ускорения — $0,180 \text{ мм}$. Регистрирующий датчик закреплялся в наиболее деформируемых областях, определенных ранее при модельных испытаниях (рис. 8). Чтобы получить данные других ортогональных плоскостей, испытания на короткое время приостанавливались и выполнялась смена ориентации датчика. Управляющая точка крепления датчика была выбрана в соответствии с ГОСТ 28203-89, п. 3.3.

В ходе испытаний для каждой ортогональной оси ИТПК были получены два массива данных. На первом этапе (до) и на втором (после, спустя некоторое время) осуществлялся поиск резонансов в конструкции. В результате сравнения полученных амплитуд и частот установлено, что на всем диапазоне сдвиг частот не превысил 5 %, а наибольший сдвиг амплитуды составил 18 % на частоте 40,2 Гц в плоскости Y . Полученные значения в соответствии со стандартом ECSS-E-ST-10-03C, п. 5.5.2.5, свидетельствуют, что спроектированное устройство может



Рис. 7



Рис. 8

использоваться в качестве оснастки при вибродинамических испытаниях наноспутников. Расхождение значений резонансных частот, полученных при натурных и модельных испытаниях, не превысило 5 %, что удовлетворяет требованиям сходимости результатов измерений согласно ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002, п. 3.16.

Вывод. Изменения, внесенные в конструкцию ранее разработанного ИТПК, привели к снижению его массы на 4,85 %. При этом модернизированное устройство позволяет тестировать спутники стандарта CubeSat 6U, максимальная масса которых на 33,33 % больше максимальной массы спутников CubeSat 3U. Полученная суммарная масса 20,4 кг не превышает максимального нагружения вибростенда ВИКАМ 35/14.

Результаты модельного исследования и натурных испытаний демонстрируют, что спроектированное устройство может использоваться в качестве оснастки при вибродинамических испытаниях спутников стандарта CubeSat 6U.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомин Д. В., Струков Д. О., Герман А. С. Универсальная платформа полезной нагрузки для малых спутников стандарта CubeSat // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 5. С. 446–449. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-446-449.
2. Голых А. Е., Фомин Д. В. Поворотный комплекс для проведения вибродинамических испытаний наноспутников // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 6. С. 472–482. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-472-482.
3. Heidt H. et al. CubeSat: A new Generation of Picosatellite for Education and Industry LowCost Space Experimentation // 14th Annual/USU Conf. on Small Satellites, Logan, Utah, Aug. 21–24, 2000.
4. Пат. 2796176 C1 РФ, МПК B64G 7/00. Поворотное устройство имитатора транспортно-пускового контейнера спутника CubeSat 1-3U / Д. В. Фомин, А. Е. Голых. Заявл. 27.12.2022. Оpubл. 17.05.2023.
5. Электромеханический вибрационный стенд ВИКАМ-35/14 [Электронный ресурс]: <https://technoprism.ru/catalog/proizvodstvo-ispytatelnogo-oborudovaniya/ispytatelnye-stendyvikam/elektromekhanicheskiy-vibratsionnyy-stend-vikam-35>, 09.10.2023.
6. Спецификация спутников стандарта CubeSat 1U-12. CubeSat Design Specification Rev. 14.1 The CubeSat Program, Cal Poly SLO [Электронный ресурс]: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf, 09.10.2023.
7. Космический аппарат „Маяк“. Программа и методика испытаний на статическую гидродинамическую прочность [Электронный ресурс]: <https://www.your-sector-of-space.org/gallery/%D0%BC%D0%B0%D1%8F%D0%BA-%D0%B2%D0%B4%D0%B8-%D0%BF%D0%BC-1-%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82.pdf>, 09.02.2024.
8. SolidWorks, разд. Simulation (справка). [Электронный ресурс]: help.solidworks.com, 14.11.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Дмитрий Владимирович Фомин** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Амурский государственный университет, научно-образовательный центр им. К. Э. Циолковского; директор; E-mail: e-office@yandex.ru
- Артём Евгеньевич Голых** — магистрант, Амурский государственный университет; лаборатория малых космических аппаратов научно-образовательного центра им. К. Э. Циолковского; инженер; E-mail: toksikccc@gmail.com

Поступила в редакцию 12.10.2023; одобрена после рецензирования 16.02.2024; принята к публикации 16.05.2024.

REFERENCES

1. Fomin D.V., Strukov D.O., German A.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 5(61), pp. 446–449, DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-446-449. (in Russ.)
2. Golykh A.E., Fomin D.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 6(66), pp. 472–482, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-472-482. (in Russ.)
3. Heidt H. et al. *14 Annual/USU Conference on Small Satellites*, Logan, Utah, 14, August 21–24, 2000. SSC00V5.
4. Pat. RU 2796176C1, *Povorotnoye ustroystvo imitatora transportno-puskovogo konteynera sputnika CubeSat 1-3U* (Rotary Device of Cubesat 1-3u Satellite Transport and Launch Container Simulator), D.V. Fomin, A.E. Golykh, Patent application no. 2022134380, Priority 27.12.2022, Published 17.05.2023, Bulletin 14. (in Russ.)
5. <https://technoprist.ru/catalog/proizvodstvo-ispytatelnogo-oborudovaniya/ispytatelnye-stendyvikam/elektromekhanicheskiy-vibratsionnyy-stend-vikam-35/>. (in Russ.)
6. https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf. (in Russ.)
7. <https://www.your-sector-of-space.org/gallery/%D0%BC%D0%B0%D1%8F%D0%BA-%D0%B2%D0%B4%D0%B8-%D0%BF%D0%BC-1-%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82.pdf>. (in Russ.)
8. help.solidworks.com. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- Dmitry V. Fomin** — PhD, Associate Professor; Amur State University, K. E. Tsiolkovsky Scientific and Educational Center; Director; E-mail: e-office@yandex.ru
- Artem E. Golykh** — Graduate Student; Amur State University, K. E. Tsiolkovsky Scientific and Educational Center, Laboratory of Small Spacecrafts; Engineer; E-mail: toksikccc@gmail.com

Received 12.10.2023; approved after reviewing 16.02.2024; accepted for publication 16.05.2024

УДК 681.7.068.2; 681.586.5
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-593-598

ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО КАК ОСНОВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИГНАЛИЗАТОРА КИПЕНИЯ ЖИДКОСТИ

С. В. Жданович¹, А. О. Зеневич¹, Т. Г. Коваленко^{1*},
Т. М. Мансуров², Е. В. Новиков¹

¹ Белорусская государственная академия связи, Минск, Беларусь

* t.kovalenko@bsac.by

² Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Аннотация. Исследуется возможность использования одномодового оптического волокна, применяемого в телекоммуникациях, для создания сигнализатора кипения жидкости. Установлено, что при достижении температуры (точки) кипения жидкости происходит изменение коэффициента отражения оптического излучения от границы раздела сред — сердцевины волокна и жидкости. В результате увеличивается мощность оптического сигнала, обратно отраженного в волокно от границы раздела таких сред. Увеличение мощности отраженного сигнала до определенного значения свидетельствует о достижении точки кипения жидкости. Показано, что для определения момента точки достижения кипения можно использовать информационный параметр — разность между значением ослабления по шкале рефлектометра в точке максимума для пика рефлектограммы одномодового телекоммуникационного оптического волокна и значением ослабления по шкале рефлектометра перед пиком этой рефлектограммы.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, сигнализатор, одномодовое оптическое волокно, оптическое излучение, точка кипения, кипение жидкости

Ссылка для цитирования: Жданович С. В., Зеневич А. О., Коваленко Т. Г., Мансуров Т. М., Новиков Е. В. Оптическое волокно как основа для создания сигнализатора кипения жидкости // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 7. С. 593–598. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-593-598.

OPTICAL FIBER AS A BASIS FOR CREATING A LIQUID BOILING ALARM

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

¹ Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus

* t.kovalenko@bsac.by

² Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Abstract. The possibility of using single-mode optical fiber applied in telecommunications to create a liquid boiling alarm is investigated. It is established that when the temperature of liquid boiling is reached, the coefficient of optical radiation reflection by the interface of two media — the fiber core and the liquid — changes. As a result, the power of optical signal reflected back into the fiber from the interface of such media increases. An increase in the power of the reflected signal to a certain value indicates that the boiling point of the liquid has been reached. It is shown that the difference between the attenuation value on the reflectometer scale at the maximum point for the peak of the reflectogram of a single-mode telecommunication optical fiber and the attenuation value on the reflectometer scale before the peak of this reflectogram can be used as an information parameter for determining the moment of reaching the boiling point.

Keywords: optical fiber sensor, warning device, single-mode optical fiber, optical radiation, boiling point, liquid boiling

For citation: Zhdanovich S. V., Zenevich A. O., Kovalenko T. G., Mansurov T. M., Novikov E. V. Optical fiber as a basis for creating a liquid boiling alarm. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 7. P. 593–598 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-593-598.

Введение. Для контроля за температурой кипения (точкой кипения) жидкости в различных технологических процессах в настоящее время используются сигнализаторы кипения жидкости. Большинство таких сигнализаторов являются электрическими устройствами [1–5], которые не

могут быть использованы в пожароопасных помещениях и, кроме того, усложняют осуществление телеметрических измерений.

Для проведения телеметрических измерений целесообразно использовать волоконно-оптические датчики, достаточно легко сопрягаемые с оптическим волокном [6, 7]. Данные о состоянии таких датчиков можно определять на достаточно протяженных расстояниях (до 25 км) [8, 9].

Как указано в [5], для определения момента начала кипения жидкости используется волоконно-оптический датчик на основе макроизгиба оптического волокна. Однако из-за достаточно больших потерь мощности оптического излучения в макроизгибе такой датчик не может быть использован для телеметрических измерений. Ранее авторами настоящей статьи был предложен волоконно-оптический датчик идентификации жидкостей и определения концентрации растворенных в воде веществ [10]. Принцип работы этого датчика основан на измерении сигнала, отраженного от границы раздела сред — сердцевины оптического волокна и окружающей среды. Показано, что коэффициент отражения излучения от такой границы зависит от показателя преломления вещества, составляющего окружающую среду [11].

Если изначально оптическое волокно находится в жидкости, то при кипении жидкости осуществляется ее переход из жидкого состояния в газообразное. Окружающая среда, в которой находится волокно, изменяется. Одновременно изменяется и показатель преломления оптического излучения в среде. Изменение показателя преломления приводит к изменению коэффициента отражения оптического сигнала от границы раздела сред, а следовательно, и к изменению уровня такого сигнала. Контролируя уровень отраженного сигнала, можно определить момент достижения точки кипения жидкости.

Однако в настоящее время нет сведений о возможности использования применяемых в телекоммуникациях оптических волокон для реализации такого способа. В этой связи цель настоящей статьи — определение возможности использования одномодового оптического волокна, применяемого в телекоммуникациях, для создания сигнализатора кипения жидкости.

Экспериментальная установка и методика исследования. При проведении исследований использовалось телекоммуникационное одномодовое оптическое волокно типа G657. Выбор типа волокна обусловлен тем, что оно достаточно часто применяется в оптическом кабеле. Также использование данного типа оптического волокна позволяет упростить процесс сопряжения сигнализатора кипения жидкости с кабелем, применяемым в системах мониторинга для передачи данных [12]. Помимо этого, такое волокно достаточно устойчиво к изгибам, и к его монтажу не предъявляются строгие требования [13, 14].

Структурная схема установки, предназначенной для проведения экспериментальных исследований возможности использования оптического волокна G657 для создания сигнализатора кипения жидкости, показана на рис. 1, где Р — оптический рефлектометр, К — катушка с оптическим волокном ОВ₁, С — резервуар с жидкостью, Т — термометр, Н — нагреватель, П — приемник оптического излучения, И — источник оптического излучения, ОР — оптический разветвитель, ОВ₂ — оптоволоконно.

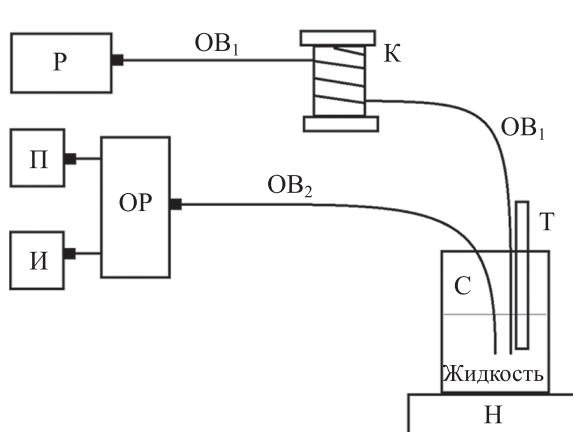


Рис. 1

Экспериментальная установка содержит оптический рефлектометр Р, к которому подключена катушка К с оптическим волокном ОВ₁. В качестве рефлектометра применялся калиброванный и поверенный оптический измерительный прибор МТР 6000. Волокно ОВ₁ помещено в резервуар с жидкостью С. Протяженность волокна, намотанного на катушку, составляет 500 м. Выбор такой протяженности объясняется тем, что она превышает мертвую зону рефлектометра. Рефлектометр работает на длине волны 1310 нм, соответствующей окну прозрачности оптического волокна G657.

С помощью рефлектометра были получены рефлектограммы волокна ОВ₁. Каждая рефлектограмма содержит пик, соответствующий местоположению границы раздела сред [8].

Для идентификации окружающей среды по коэффициенту отражения использовался информационный параметр $\Delta\alpha$, аналогичный введенному в работах [10, 15] и представляющий собой разность между значением ослабления по шкале рефлектометра в точке максимума для пика рефлектограммы одномодового телекоммуникационного оптического волокна и значением ослабления по шкале рефлектометра перед пиком этой рефлектограммы.

Информационный параметр $\Delta\alpha$ определялся для длительности зондирующего импульса 25 нс. Это связано с тем, что согласно [10] при длительности зондирующих импульсов рефлектометра меньше 25 нс наблюдается существенная нестабильность величины $\Delta\alpha$. Согласно этой работе для исключения такой нестабильности при определении информационного параметра необходимо использовать диапазон длительности зондирующего импульса от 25 до 300 нс.

В резервуар С с жидкостью (см. рис. 1) также помещено оптическое волокно ОВ₂. Другой конец этого волокна подключен к оптическому разветвителю ОР. К выходам разветвителя подключены источник оптического излучения И и приемник оптического излучения П, в качестве которых используются источник оптического излучения и приемник, входящие в состав калиброванного оптического тестера ОТ-3-1.

Разветвитель ОР разделяет мощность оптического излучения, поступающего на его вход, на две равные части. Источник через разветвитель направляет оптическое излучение с постоянной мощностью (1 мВт) в оптоволокно ОВ₂. Такая мощность является достаточной для регистрации излучения, отраженного от торца оптического волокна, при этом длина волокна небольшая. Длина волны оптического излучения такая же, как и длина волны зондирующих импульсов рефлектометра — 1310 нм.

Часть оптического излучения, распространяющегося по ОВ₂, в точке соприкосновения торца этого волокна с внешней средой выходит за его пределы во внешнюю среду. Другая часть излучения отражается от границы раздела сред и распространяется обратно по оптоволокну ОВ₂ и через разветвитель поступает на приемник. Приемник измеряет мощность, отраженную от торца волокна ОВ₂. Для того чтобы можно было пренебречь потерей мощности оптического излучения, распространяющегося по волокну ОВ₂, его длина была выбрана равной 1 м.

По результатам проведенных измерений вычисляется значение коэффициента отражения сигнала от границы раздела сред по следующей формуле:

$$k = \frac{2P_o}{P_{\Pi}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где P_{Π} — мощность оптического излучения, падающего на границу раздела сред; P_o — мощность оптического излучения, регистрируемая приемником; величина P_o в приведенной формуле умножалась на два: это необходимо, чтобы учесть деление мощности оптического излучения в разветвителе ОР на две равные части (как отмечено выше, на приемник П поступает только одна часть этого излучения).

Жидкость, находящаяся в резервуаре С, подогревалась с помощью нагревателя Н. Изменение температуры жидкости варьировалось в интервале от 20 до 125 °С — такой интервал был выбран, поскольку ему соответствует температура кипения исследуемых жидкостей. Температура жидкости контролировалась термометром Т.

В ходе экспериментов исследования проводились при температуре воздуха 20–23 °С и влажности до 80 %. При таких условиях измерения сохранялась стабильность мощности источников оптического излучения и параметры приемника оптического излучения оставались неизменными.

Результаты эксперимента и их обсуждение. В качестве среды для проведения исследования использовались вода, этиловый спирт и изопропиловый спирт. Были выбраны жидкости, которые имеют достаточно большую разность между показателями преломления жидкого и

Вещество	Температура, °С	Коэффициент отражения, %
Вода	20	0,19
	60	0,19
	100	0,30
Этиловый спирт	20	0,02
	60	0,02
	82	0,06
Изопропиловый спирт	20	0,03
	60	0,03
	83	0,08

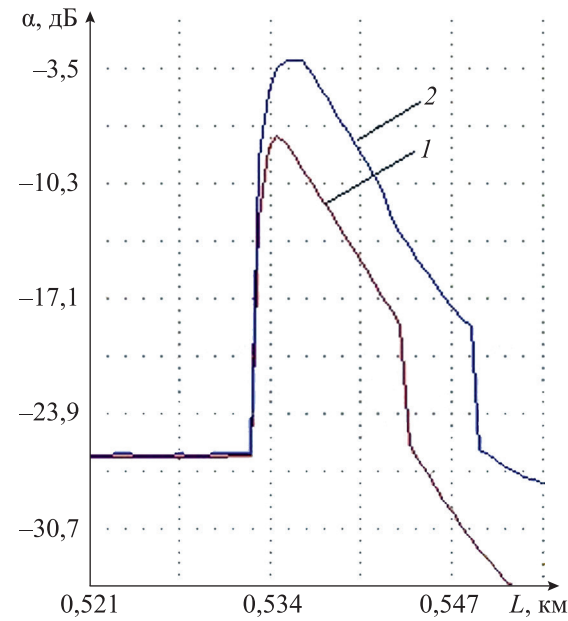


Рис. 2

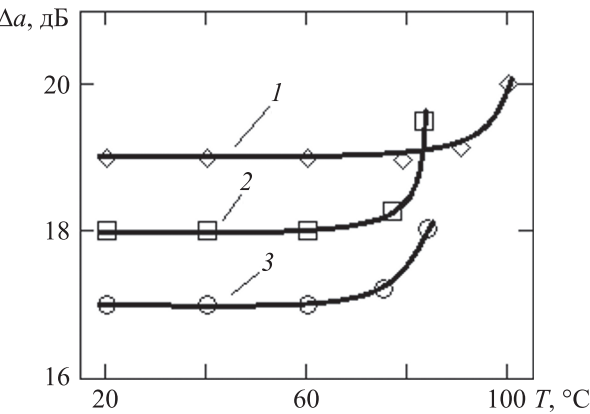


Рис. 3

газообразного состояния: $\Delta n \geq 0,3$. Отметим, что при нагревании сердцевины оптического волокна показатель преломления изменяется незначительно, в отличие от исследуемых жидкостей. Поэтому таким изменением при проведении исследований можно было пренебречь.

При выполнении исследований получены значения коэффициентов отражения k при различной температуре жидкости, в которой находится торец оптического волокна ОВ₂. Результаты эксперимента представлены в таблице. Анализ таблицы показывает, что для всех исследуемых жидкостей при достижении температуры кипения (температура кипения воды 100 °С, этилового и изопропилового спиртов — 82 и 83 °С соответственно) наблюдается увеличение коэффициента отражения k до некоторого значения.

В ходе исследований получены также рефлектограммы оптического волокна ОВ₁ для различных температур. На рис. 2 показаны участки рефлектограмм, соответствующие местоположению границы раздела сред — сердцевины волокна и воды, полученные при температуре воды 20 °С (кривая 1) и температуре кипения воды (кривая 2). Для других исследуемых жидкостей такие участки рефлектограмм, полученные при температуре 20 °С и температуре их кипения, были аналогичными. Как видно из рис. 2, пик рефлектограммы, соответствующий температуре кипения, и пик рефлектограммы, полученной при температуре 20 °С, различаются, и, соответственно, различна величина информационного параметра $\Delta\alpha$.

Зависимости информационного параметра $\Delta\alpha$ от температуры жидкости представлены на рис. 3, где 1 — вода, 2 — изопропиловый спирт, 3 — этиловый спирт. Как следует из этих зависимостей, до температуры кипения жидкости значение параметра $\Delta\alpha$ практически не изменяется. При достижении температуры кипения наблюдается рост информационного параметра.

Таким образом, контролируя информационный параметр при нагреве жидкости, можно определить температуру ее кипения.

Заключение. Установлено, что для всех исследуемых жидкостей при достижении температуры

(точки) их кипения наблюдается увеличение коэффициента отражения оптического излучения от границы раздела сред — сердцевины волокна и окружающей среды.

Информационный параметр $\Delta\alpha$, представляющий собой разность между значением ослабления по шкале рефлектометра в точке максимума для пика рефлектограммы одномодового телекоммуникационного оптического волокна и значением ослабления по шкале рефлектометра перед пиком этой рефлектограммы, практически не изменяется до температуры кипения

жидкости. При достижении температуры кипения наблюдается увеличение этого параметра. Следовательно, параметр Δa можно использовать для определения достижения точки кипения жидкости.

Таким образом, показана возможность использования оптического волокна для создания сигнализатора кипения жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Датчики температуры: виды и характеристики [Электронный ресурс]: <https://smarthof.ru/info/datchiki-temperature>, 01.02.2024.
2. Промышленные датчики температуры [Электронный ресурс]: <https://belorg.by/brendyi/endress-hauser/izmerenie-temperatureyi/promyshlennyye-datchiki-temperatureyi/>, 01.02.2024.
3. А. с. 951086 СССР, кл. G 01K 11/06. Индикатор температуры / В. А. Беломорцев, В. А. Керножицкий, А. И. Федоров. Заявл. 20.05.80. Опубл. 15.08.82. Бюл. № 30.
4. А. с. 1583812 СССР, кл. G 01N 25/08. Способ определения теплофизических характеристик кипящей жидкости / С. П. Логвиненко, В. С. Мотузко. Заявл. 19.07.88. Опубл. 07.08.90. Бюл. № 29.
5. Пат. 2023994 РФ, G 01 K 11/12. Сигнализатор кипения жидкости / Г. Т. Кирич, А. И. Яценко. Заявл. 16.04.1990. Опубл. 30.11.1994.
6. Гулаков И. Р., Зеневич А. О. Волоконно-оптические датчики физических величин: монография. Минск: Белорусская государственная академия связи, 2022.
7. Кабели-датчики для распределенного мониторинга [Электронный ресурс]: <https://incabspecialty.ru/techhub/kabeli-datchiki-dlya-raspredelennogo-monitoringa/>, 02.02.2024.
8. Листвин А. В. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРПарт, 2005. 208 с.
9. Русанов Ю. А. Мониторинг протяженных объектов транспортной инфраструктуры. Неэлектрические решения // Мониторинг. Наука и безопасность. 2011. № 1. С. 62–73.
10. Зеневич А. О., Коваленко Т. Г., Новиков Е. В., Жданович С. В. Волоконно-оптический датчик идентификации жидкостей и определения концентрации растворов // Докл. БГУИР. 2023. Т. 21, № 6. С. 14–20. DOI: 10.35596/1729-7648-2023-21-6-14-20.
11. Шредер Г., Трайбер Х. Техническая оптика: Пер. с нем. М.: Техносфера, 2006. 424 с.
12. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРПарт, 2003. 288 с.
13. Recommendation ITU-T G.657 (11/2016). Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable. Geneva, 2017.
14. Денисов И. В., Лисовский Н. В. Систематизация чувствительных к изгибу волоконных световодов // Прикладная фотоника. 2023. Т. 10, № 1. С. 131–148.
15. Зеневич А. О., Мансуров Т. М., Коваленко Т. Г., Новиков Е. В., Жданович С. В., Матковская Т. А. Оптическое волокно как основа для создания датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 895–901. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-895-901.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- | | |
|-------------------------------------|--|
| Сергей Вячеславович Жданович | — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи, отраслевая лаборатория перспективных информационно-коммуникационных технологий; заведующий лабораторией; E-mail: zsvzsv@tut.by |
| Андрей Олегович Зеневич | — д-р техн. наук, профессор; Белорусская государственная академия связи; ректор; E-mail: a.zenevich@bsac.by |
| Татьяна Георгиевна Коваленко | — Белорусская государственная академия связи; отраслевая лаборатория перспективных информационно-коммуникационных технологий; научный сотрудник; E-mail: t.kovalenko@bsac.by |
| Тофиг Магомедович Мансуров | — д-р техн. наук, профессор; Азербайджанский технический университет, кафедра радиотехники и коммуникации; E-mail: tofig-mansurov@rambler.ru |
| Евгений Владимирович Новиков | — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи, Институт современных технологий связи; директор; E-mail: e.novikov@bsac.by |

Поступила в редакцию 28.02.2024; одобрена после рецензирования 01.04.2024; принята к публикации 16.05.2024.

REFERENCES

1. <https://smarthof.ru/info/datchiki-temperatury>. (in Russ.)
2. <https://belorg.by/brendyi/endress-hauser/izmerenie-temperaturyi/promyshlennyye-datchiki-temperaturyi/>. (in Russ.)
3. USSR Copyright Certificate No. 951086, k. G01K 11/06, 1980.
4. USSR Copyright Certificate No. 1583812, k. G01N 25/08, 1988.
5. Russian Federation Patent No. 2034994, 30.11.1994.
6. Gulakov I.R., Zenevich A.O. *Volokonno-opticheskiye datchiki fizicheskikh velichin* (Fiber-Optic Sensors of Physical Quantities), Minsk, 2022, 367 p. (in Russ.)
7. <https://incabspecialty.ru/techhub/kabeli-datchiki-dlya-raspredelennogo-monitoringa/>. (in Russ.)
8. Listvin A.V. *Reflektometriya opticheskikh volokon* (Reflectometry of Optical Fibers), Moscow, 2005, 208 p. (in Russ.)
9. Rusanov Yu.A. *Monitoring. Nauka i bezopasnost'* (Monitoring. Science and safety), 2011, no. 1, pp. 62–73. (in Russ.)
10. Zenevich A.O., Kovalenko T.G., Novikov E.V., Zhdanovich S.V. *Doklady BGUIR*, 2023, no. 6(21), pp.14–20, <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-14-20>. (in Russ.)
11. Schroder G., Treiber H. *Technische Optik. Grundlagen und Anwendungen*, Vogel, 2002, 288 s.
12. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrkov D.V. *Opticheskiye volokna dlya liniy svyazi* (Optical Fibers for Communication Lines), Moscow, 2003, 288 p. (in Russ.)
13. Recommendation ITU-T G.657 (11/2016) *Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable*, Geneva, 2017, 24 p.
14. Denisov I.V., Lisovsky N.V. *Applied Photonics*, 2023, no. 1(10), pp. 131–148. (in Russ.)
15. Zenevich A.O., Mansurov T.M., Kovalenko T.G., Novikov E.V., Zhdanovich S.V., Matkovskaia T.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 12(65), pp. 895–901, DOI 10.17586/0021-3454-2022-65-12-895-901. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

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

Received 28.02.2024; approved after reviewing 01.04.2024; accepted for publication 16.05.2024

УДК 621.317.412; 537.621.4; 537.622.4
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-599-608

ВАРИАНТЫ МАГНИТНО-РЕОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ОДИНОЧНОЙ ЧАСТИЦЫ

Д. А. Сандуляк

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия
d.sandulyak@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются особенности и варианты предложенного метода определения магнитной восприимчивости χ такого специфичного ферро(ферри)магнетика, как одиночная частица малых размеров. Метод базируется на анализе конкуренции сил, в том числе магнитной, зависимой от χ , действующих на исследуемую частицу, перемещающуюся по вертикали в столбе покоящейся жидкости. Сформулированы требования к реализации магнитно-реологического метода (МР-метода), исполнение которых позволит обоснованно свести в общем случае трехмерную задачу определения χ к результирующей одномерной, причем к вполне приемлемому для достижения решения уравнению баланса сил. Рассматриваются три варианта МР-метода: с перемещением частицы вниз, с ее перемещением вверх и с управляемым перемещением вверх до состояния зависания. Приведены соответствующие выражения для определения χ по данным, получаемым при выполнении опытов.

Ключевые слова: магнитно-реологический метод, одиночная частица, магнитная восприимчивость, неоднородное поле, магнитный силовой фактор

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания в сфере науки (проект FSFZ-2024-0005).

Ссылка для цитирования: Сандуляк Д. А. Варианты магнитно-реологического метода контроля магнитной восприимчивости одиночной частицы // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 7. С. 599–608. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-599-608.

VARIANTS OF MAGNETIC-RHEOLOGICAL METHOD FOR MONITORING THE MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF A SINGLE PARTICLE

D. A. Sandulyak

MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia
d.sandulyak@mail.ru

Abstract. Features and variants of the proposed new method for determining magnetic susceptibility χ such a specific ferro (ferry) magnetic as a single particle of small size are described — on the basis of an analysis of the competition of forces, including magnetic force (dependent on χ), acting on the studied particle moving vertically in a column of resting liquid. It is stated that the fulfillment of the formed requirements for the implementation of the magneto-rheological method (MR-method) will allow to reasonably reduce in the general case the three-dimensional problem of determining χ to a productive one-dimensional one, and to a force balance equation that is quite acceptable for achieving a solution. Three variants of the MR-method are considered: with the movement (forced sedimentation) of the particle down, with its movement up and with the controlled movement of the particle up to the state of its hanging. The corresponding expressions for determining χ from data obtained during experiments are given.

Keywords: magnetic-rheological method, single particle, magnetic susceptibility, inhomogeneity magnetic field, magnetic force factor

Acknowledgments: the research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSFZ-2024-0005).

For citation: Sandulyak D. A. Variants of magnetic-rheological method for determining the magnetic susceptibility of a single particle. Journal of Instrument Engineering. 2024. Vol. 67, N 7. P. 599–608 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-599-608.

Введение. Вопрос контроля магнитных свойств такого ферро(ферри)магнетика, как одиночная частица малых размеров, долгое время остается открытым. Это сдерживает развитие промышленных, природоохранных, медико-биологических технологий, связанных с магнитным воздействием на дисперсные среды, которые содержат фракцию магнитоактивных частиц, например, при магнитном разделении (сепарации), магнитофореze.

В [1] описывается активно разрабатываемый метод контроля, когда по данным экспериментально получаемой и анализируемой концентрационной зависимости магнитной восприимчивости дисперсного (порошкового, разреженного — при разобщенных частицах) образца можно определять магнитную восприимчивость χ отдельной частицы [1–4].

В дополнение к этому оригинальному методу, позволяющему судить о восприимчивости среднестатистической частицы, без детализации данных χ для той или иной частицы, в [5, 6] рассматривается ранее в отечественной и зарубежной практике не применявшийся метод определения χ одиночной, т. е. отдельно взятой, частицы путем осуществления принудительной, усиливаемой воздействием специально создаваемого неоднородного магнитного поля, вертикальной седиментации исследуемой частицы в столбе жидкости. В отличие от известного, формально родственного по принципу седиментации метода вискозиметрии, где результат — определение динамической вязкости жидкости — следует из баланса действующих на частицу сил, в данном методе [5, 6] за счет появления дополнительно магнитной силы, зависящей от параметра χ , именно этот параметр выступает в качестве искомого.

Такой метод, названный магнитно-реологическим (МР-метод) [5, 6], при определенным образом организованном магнитном силовом воздействии может быть представлен несколькими, обладающими индивидуальными особенностями вариантами его исполнения.

Базовые положения и варианты МР-метода. Принцип вискозиметрии как предпосылка к МР-методу. В основе подхода к разработке МР-метода контроля магнитной восприимчивости χ одиночной частицы лежит ряд физических представлений, технико-метрологических и процедурных решений, присущих одному из широко известных подходов к методу определения динамической вязкости η жидкости [5, 6]. Так, напомним, этот подход сводится к седиментации шара диаметром δ и плотностью ρ в столбе покоящейся жидкости плотностью ρ_η с регистрацией времени τ вертикального фиксируемого перемещения h шара при установившемся режиме седиментации. Силе тяжести шара $F_g = \pi\delta^3\rho g/6$ противодействуют две силы: сила Архимеда $F_A = \pi\delta^3\rho_\eta g/6$ и сила Стокса $F_S = 3\pi\delta\eta v = 3\pi\delta\eta h/\tau$ при соблюдении ламинарного режима, т. е. при малых числах Рейнольдса, когда $Re = v\delta\rho_\eta/\eta < 2$ [7], v — постоянная скорость шара в жидкости. Исходя из справедливого условия баланса этих трех сил, действующих по одной и той же вертикали, постоянных по величине, ответственных за равномерное движение шара в жидкости (в этом случае инерционная сила отсутствует, иначе это потребовало бы составления и решения дифференциального уравнения динамики):

$$F_g - F_A - F_S = 0, \quad (1)$$

нетрудно получить известную формулу для определения η , а именно: $\eta = \delta^2 g(\rho - \rho_\eta)\tau/18h$.

Когда форма тела (частицы) отличается от модельной сферической и характеризуется эквивалентным диаметром δ , что для частицы может оцениваться, в частности, по данным микроскопии, в выражение для силы Стокса следует ввести поправочный коэффициент $k > 1$. Будучи величиной, обратной так называемому коэффициенту формы ϕ для разных частиц, т. е. $k = 1/\phi$, где $\phi = 0,66 \dots 0,77$ — отношение скоростей осаждения несферической и сферической частиц [7], оценочно $k \cong 1,4$. Следовательно, в этом, более общем, случае $\eta = \delta^2 g(\rho - \rho_\eta)\tau/18kh$.

Нелишне при этом отметить, что в случае когда вязкость η используемой в опытах жидкости известна, это выражение для η может послужить решению обратных, в данном случае сопутствующих, задач, т. е. получению сведений о других, фигурирующих в этом выражении параметрах. В частности, это касается кажущегося проблемного определения значения плотности ρ изучаемого тела (частицы), например, в отсутствие соответствующей информации об элементном составе как $\rho = \rho_\eta + 18k\eta h/\delta^2 g\tau$.

Требования к реализации магнитного силового воздействия в МР-методе. Когда сферическая или несферическая частица, перемещающаяся в жидкости, дополнительно к указанным в (1) силам подвергается еще и воздействию магнитной (пондеромоторной) силы F_m , вызванной влиянием на нее неоднородного магнитного поля, это так или иначе отражается на ее перемещении. К факторам, от которых зависят изменения в перемещении частицы, относятся ее магнитные свойства, а значит, их можно в принципе установить, фиксируя эти изменения.

Что касается величины магнитной силы, действующей в неоднородном магнитном поле на одиночную малую частицу объемом V , то она выражается как [8–15] $F_m = \mu_0 \chi V H \text{grad} H$ или $F_m = \chi V B \text{grad} B / \mu_0$, причем магнитная восприимчивость χ частицы соответствует значению напряженности H или, что то же самое, индукции $B = \mu_0 H$ поля в „точке“ местоположения частицы, с учетом того, что при вынужденном перемещении частицы в неоднородном поле значения H и B изменяются; здесь $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м — магнитная константа.

В общем случае осуществления принудительной седиментации исследуемой частицы, т.е. при произвольном магнитном силовом воздействии, а не специально организованном по направлению и характеру изменения, задача о параметрах перемещения частицы становится трехмерной: необходимо прибегать к составлению системы дифференциальных уравнений динамики движения частицы и последующим попыткам ее решения. Это в существенной мере усложняет получение ожидаемых результатов.

Говорить же о возможности исходить из удобного условия баланса сил, здесь четырех, по примеру условия (1) следует лишь после обоснованной организации магнитной силы применительно к ключевой цели получения информации о магнитных свойствах частицы. Так, эта возможность появится, когда удастся, во-первых, ориентировать магнитную силу F_m вдоль линии действия характерных для обычной седиментации сил, фигурирующих в (1) — гравитационной F_g , Архимеда F_A , Стокса F_S , и, во-вторых, сохранить силу F_m постоянной в пределах ограниченного, специально фиксируемого, перемещения h исследуемой частицы. Только такой подход к организации магнитной силы, которая должна воздействовать на исследуемую частицу, позволит упростить задачу до одномерной и избежать проявления инерционных сил.

Отсюда и два соответствующих принципиальных требования именно к осуществлению принудительной седиментации исследуемой частицы для реализации МР-метода [5, 6], когда можно обоснованно воспользоваться условием баланса сил наподобие условия (1) в расширенном (с учетом силы F_m) варианте.

Выполнение этих требований не вызывает затруднений, если для создания неоднородного магнитного поля, воздействующего на исследуемую частицу, использовать магнитометр с оригинальной электромагнитной системой (рис. 1): в ней магнитопровод 1, на котором расположена обмотка 2, имеет полюсные наконечники 3 сферической формы [16]. При реализации МР-метода сосуд с жидкостью 4, где осуществляется перемещение исследуемой частицы 5 (затемненная точка), размещается посередине между полюсами-полусферами перпендикулярно межцентровой линии полюсов. В этом случае магнитная сила F_m , которая действует в плоскости симметрии межполюсной области, направлена к центру симметрии по одной и той же, как и силы F_g , F_A , F_S , вертикальной линии. К тому же такие полюсные наконечники (рис. 1) обеспечивают получение магнитной силы F_m , которая в определенной зоне создаваемого неоднородного поля характеризуется практически постоянными значениями. Это обусловлено тем, что получаемая координатная характеристика индукции B в направлении x между полюсами-полусферами действия магнитной силы (т.е. зависимость B от x) имеет примечательный перегиб [16], а значит, координатная характеристика градиента $\text{grad} B \cong dB/dx$ (или $\text{grad} H \cong dH/dx$) приобретает экстремальный вид. Более того, экстремальный вид приобретает и координатная характеристика фигурирующего в выражении для F_m магнитного силового фактора $B \text{grad} B$ (или $H \text{grad} H$), причем известными становятся как местоположение, так и пределы исполнительной зоны его практического постоянства — в окрестности экстремума [17]. Эти соответственно маркируемые пределы (верхний 6 и нижний 7 на рис. 1, а, которые удобно помечать световыми маркерами

на стенке сосуда — от лучей, испускаемых лазерными модулями [1]), становятся пределами фиксируемого перемещения h исследуемой частицы 5 в столбе жидкости 4.

Следовательно, выполняя оговоренные требования к реализации МР-метода — с осуществлением принудительной седиментации исследуемой частицы 5 по вертикали, действительно можно основываться на условии баланса сил, а именно F_g , F_A , F_S и F_m . При этом наряду с соблюдением постоянства F_m , которое достигается в пределах перемещения h частицы, перепад значений напряженности поля H в этих же пределах настолько минимизирован, что это позволяет оперировать усредненным значением H и вполне соответствующим ему тем или иным значением χ .

Вариант МР-метода с принудительной седиментацией частицы (рис. 1, а). В представленном на рис. 1, а варианте МР-метода [5, 6], когда исполнительная зона, в пределах которой фиксируется перемещение h частицы, расположена выше межцентральной линии полюсов-полусфер, магнитная сила F_m , направленная вертикально вниз, способствует гравитационной силе F_g , тем самым ускоряя седиментацию. При соблюдении указанных выше требований условие баланса сил, действующих на исследуемую частицу при ее принудительной седиментации, может быть записано в расширенном по сравнению с (1) виде:

$$F_g - F_A - F_S + F_m = 0. \quad (2)$$

Из этого условия, используя приведенные выше выражения для F_g , F_A , F_S , F_m , нетрудно получить выражения (взаимно эквивалентные) для определения магнитной восприимчивости χ частицы:

$$\chi = \frac{18k \frac{\eta h}{\delta^2 \tau} - g(\rho - \rho_\eta)}{\mu_0 H \text{grad} H} \quad \text{или} \quad \chi = \frac{18k \frac{\eta h}{\delta^2 \tau} - g(\rho - \rho_\eta)}{B \text{grad} B} \mu_0. \quad (3)$$

Здесь τ — измеряемое в эксперименте время перемещения частицы в жидкости вниз в пределах исполнительной зоны.

То или иное из выражений (3) используется в зависимости от выбора параметра поля — H или B — при уже известных или дополнительно выясненных значениях η , ρ_η , δ , ρ , $B \text{grad} B$ (или $H \text{grad} H$).

Вариант МР-метода с принудительным перемещением частицы вверх (рис. 1, б). В рассмотренном варианте МР-метода (см. рис. 1, а) осуществляется вертикальное перемещение исследуемой частицы в столбе жидкости вниз в пределах исполнительной зоны, расположенной выше межцентральной линии полюсных наконечников. В этом случае в условии баланса сил гравитационная F_g и магнитная F_m силы совпадают по направлению, и исследуемая частица в исполнительной зоне (вынужденно ограниченной по размерам) перемещается сравнительно быстро. Как следствие, время τ такого перемещения частицы весьма мало, что обуславливает затруднения при его регистрации и негативно влияет на ее точность, а значит, на точность контроля χ .

Что касается желаемого увеличения времени τ перемещения исследуемой частицы, то это можно легко осуществить простой перекомпоновкой ответственных элементов магнитометра. Для этого необходимо принять во внимание следующее. Координатная характеристика магнитного силового фактора применяемых полюсных наконечников сферической формы, т. е. $B \text{grad} B$ (или $H \text{grad} H$), в любом из радиальных направлений плоскости симметрии межполюсной области одинакова, причем она имеет, как сказано выше, экстремальный вид. Это говорит о том, что в окрестности экстремума значения этого фактора практически постоянны, и исполнительная зона имеется между полюсными наконечниками по вертикали как выше, так и ниже их межцентральной линии.

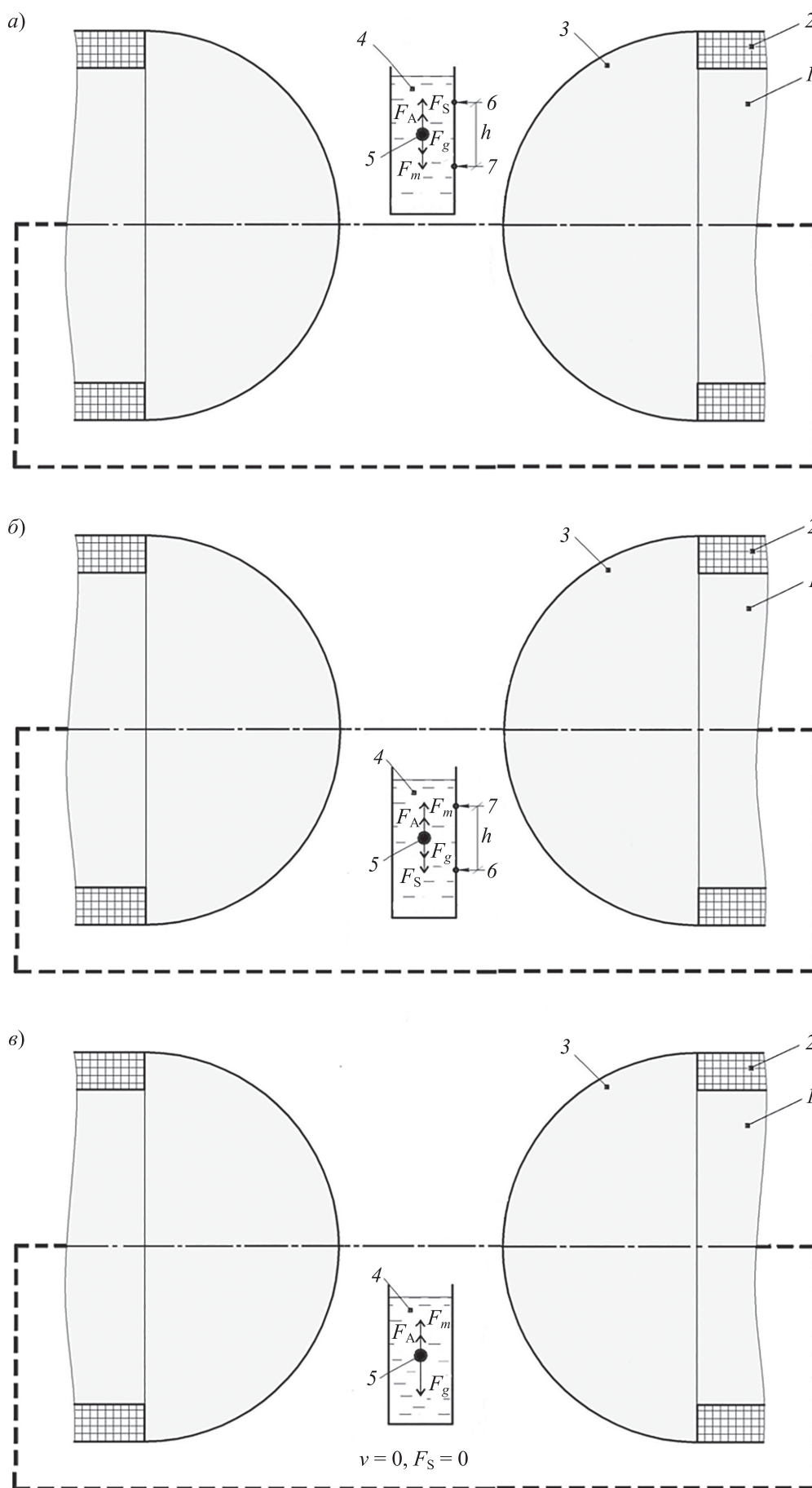


Рис. 1

Таким образом, при реализации МР-метода может быть использована также нижняя исполнительная зона (см. рис. 1, б) [18]. В ней сила тяжести F_g направлена вниз, а магнитная сила F_m направлена вверх, противодействуя друг другу. Из-за этого не только изменится направление перемещения исследуемой частицы, но и уменьшится скорость ее перемещения, таким образом будет обеспечиваться замедленное по сравнению с предыдущим вариантом МР-метода, когда F_g и F_m имеют одно направление, перемещение исследуемой частицы. Она перемещается вверх, в том числе в пределах такой же вынужденно ограниченной величины h . Исходя из справедливого для этого варианта условия баланса сил

$$F_g - F_A + F_S - F_m = 0, \quad (4)$$

соблюдая указанные выше требования и используя приведенные выше выражения для F_g , F_A , F_S , F_m , можно получить взаимно эквивалентные выражения для определения магнитной восприимчивости χ частицы, совершающей, напомним, замедленное вертикальное перемещение вверх [18]:

$$\chi = \frac{\frac{18k\eta h}{\delta^2\tau} + g(\rho - \rho_\eta)}{\mu_0 H \text{grad} H} \quad \text{или} \quad \chi = \frac{\frac{18k\eta h}{\delta^2\tau} + g(\rho - \rho_\eta)}{B \text{grad} B} \mu_0. \quad (5)$$

Входящие в эти выражения параметры соответствуют принятым ранее, с учетом того, что здесь параметр τ — это измеряемое в эксперименте время перемещения частицы в жидкости вверх от нижнего 6 до верхнего 7 предела исполнительной зоны протяженностью h , расположенной ниже межцентральной линии полюсов-полусфер.

Подобно предыдущему варианту то или иное из выражений (5) используется в зависимости от выбора параметра поля — H или B — и при уже известных или дополнительно выясненных значениях η , ρ_η , δ , ρ , $B \text{grad} B$ (или $H \text{grad} H$).

Вариант МР-метода с зависанием частицы (рис. 1, в). Для реализации предшествующих вариантов МР-метода по определению магнитной восприимчивости χ исследуемой частицы (см. рис. 1, а, б) [5, 6, 18] необходимо располагать данными, получаемыми в основном опытным путем, о значительном количестве параметров — около десяти. Между тем информацию о χ можно получить, используя менее половины из этих параметров, выполняя опыты несколько по-иному [19].

Соответствующий вариант МР-метода (см. рис. 1, в) предусматривает проведение опыта по магнитоуправляемому вертикальному перемещению частицы вверх в столбе жидкости, как в предшествующем варианте метода (см. рис. 1, б) [18]. Это перемещение осуществляется, что уже оговорено, при действии на исследуемую частицу сил тяжести F_g , Архимеда F_A , Стокса F_S , а также магнитной силы F_m , создаваемой неоднородным магнитным полем с координатными (согласно координатам перемещения частицы) характеристиками таких магнитных параметров поля, как напряженность H и/или индукция B , градиент $\text{grad} H$ и/или $\text{grad} B$. Применяемые для получения этого поля полюсные наконечники электромагнитной системы, обеспечивающей возможность изменения магнитных параметров ее токовой нагрузкой, располагают, как и ранее, по обе стороны столба жидкости. Для проведения опыта используется зона, расположенная ниже межцентральной линии полюсных наконечников: в этой зоне, напомним, сила тяжести, направленная вниз, и магнитная сила, направленная вверх, противодействуют друг другу, обуславливая возможность замедленного перемещения исследуемой частицы вверх.

При проведении опыта следует варьировать токовую нагрузку электромагнитной системы, вызывая сначала перемещение исследуемой частицы вверх, а затем торможение в перемещении вплоть до зависания частицы, когда скорость перемещения составит $v = 0$ [19]. Тем самым в состоянии зависания сила Стокса исчезает ($F_S = 0$) и ключевое условие баланса действующих на частицу сил примет следующий вид:

$$F_g - F_A - F_m = 0. \quad (6)$$

Тогда искомая магнитная восприимчивость χ исследуемой частицы определяется по любому из двух взаимно эквивалентных выражений

$$\chi = \frac{g(\rho - \rho_n)}{\mu_0 H \text{grad} H} \text{ или } \chi = \frac{g(\rho - \rho_n)}{B \text{grad} B} \mu_0, \quad (7)$$

в зависимости от того, какой из параметров выбран для проведения опытов: напряженность H или индукция $B = \mu_0 H$. При этом на основе устанавливаемых координатных характеристик параметров H и/или B , а также соответствующих координатных характеристик параметров $\text{grad} H$ и/или $\text{grad} B$ используют значения этих параметров в точке зависания частицы.

Результаты реализации МР-метода контроля магнитной восприимчивости одиночных частиц.

На рис. 2 и 3 показаны полученные по результатам экспериментов данные магнитной восприимчивости χ частиц-примесей, выделенных из проб кварцевого песка и полевого шпата (сырьевых компонентов продукции из стекла и керамики). Количество исследуемых частиц (N) в обоих случаях составляло 24 и 22. В исполнительной зоне межполюсного пространства магнитометра (полюса-полусферы диаметром 185 мм) среднее значение напряженности поля составляло $H = 80$ кА/м. В качестве жидкости, в которой осуществлялось принудительное перемещение исследуемых частиц, использовалось высоковязкое моторное масло.

Полученные данные χ представлены в виде показательных гистограмм распределения, где ось ординат — относительное количество частиц N_i/N , попавших в тот или иной интервал восприимчивости χ . Видно, что при характерных значениях магнитной восприимчивости феррочастиц песка, достигающих $\chi = 0,8$, преобладают частицы восприимчивостью $\chi \leq 0,1$ (рис. 2), а при значениях χ для феррочастиц шпата, достигающих 0,5, подавляющее число таких примесей обладают восприимчивостью $\chi \leq 0,04$ (рис. 3).

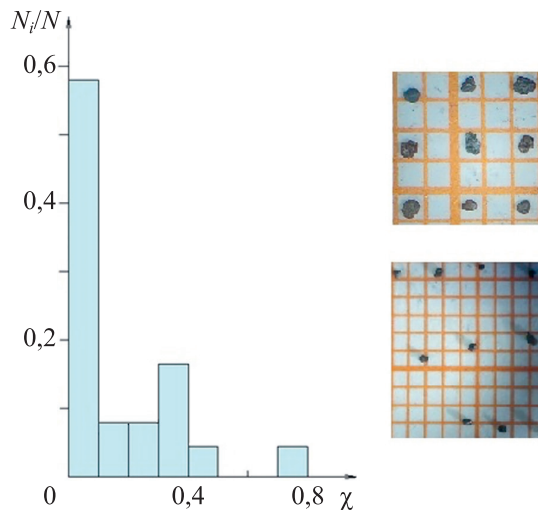


Рис. 2

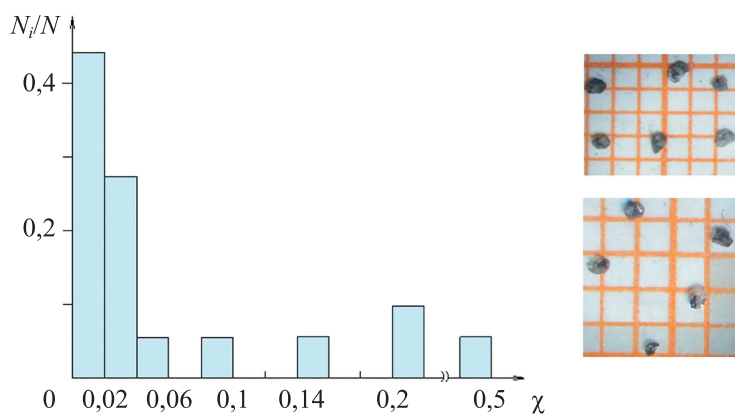


Рис. 3

Заключение. Рассмотрены особенности и варианты предложенного нового метода определения магнитной восприимчивости χ такого специфичного ферро(ферри)магнетика, как одиночная частица малых размеров, на основании анализа конкуренции сил, в том числе магнитной, зависимой от χ , действующих на исследуемую частицу, перемещающуюся по вертикали в столбе

покоящейся жидкости. Представленный магнитно-реологический метод, предпосылкой которого является один из методов вискозиметрии, реализуется при обязательно определенным образом организованном магнитном силовом воздействии на частицу. Так, магнитную силу необходимо, во-первых, ориентировать строго вдоль вертикальной линии действия сил, характерных для обычной седиментации, и, во-вторых, выдерживать постоянной в пределах ограниченной исполнительской зоны, регистрируя время перемещения в ней исследуемой частицы.

Выполнение этих, достаточно жестких, требований возможно, если для создания неоднородного поля, действующего на исследуемую частицу, использовать опробованную оригинальную электромагнитную систему — с полюсными наконечниками сферической формы, между которыми следует помещать сосуд с жидкостью, где происходит принудительное перемещение исследуемой частицы. Тогда характерная для общего случая магнитного силового воздействия сложная трехмерная задача, обязывающая составлять и решать систему дифференциальных уравнений динамики движения частицы, сводится к одномерной задаче, причем к вполне приемлемому для решения уравнению баланса сил, избегая проявления инерционной силы.

Рассмотрены три варианта МР-метода. В первом из них регистрируется время перемещения исследуемой частицы вниз в пределах исполнительской зоны, находящейся выше межцентральной линии полюсов. Так как в этом случае гравитационная и магнитная силы совпадают по направлению, частица перемещается сравнительно быстро, время ее перемещения весьма мало, его регистрация вызывает затруднения. Во втором варианте МР-метода имеется возможность увеличить время перемещения исследуемой частицы в пределах исполнительской зоны. В этом случае задействуется исполнительская зона, находящаяся ниже межцентральной линии полюсов, гравитационная и магнитная силы противодействуют друг другу, что обуславливает не только изменение направления перемещения исследуемой частицы (здесь вверх), но и уменьшение скорости ее перемещения. В третьем варианте МР-метода благодаря управлению перемещением исследуемой частицы в нижней исполнительской зоне вверх путем варьирования токовой нагрузки электромагнитной системы достигается торможение в перемещении частицы вплоть до ее зависания, тогда регистрируемыми становятся магнитные параметры поля в координате точки зависания частицы. При этом за счет исключения силы Стокса из условия баланса действующих на частицу сил количество параметров, используемых для определения магнитной восприимчивости исследуемой частицы, сокращается практически наполовину.

Для всех трех вариантов МР-метода приведены выражения, позволяющие по опытным данным определять значения магнитной восприимчивости исследуемой частицы, а также экспериментальные данные χ (при напряженности поля $H = 80$ кА/м) для феррочастиц-примесей, выделенных из таких сырьевых компонентов продукции из стекла и керамики, как песок — до 0,8 и полевой шпат — до 0,5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сандуляк Д. А., Сандуляк А. А., Полисмакова М. Н., Ершова В. А., Сандуляк А. В., Курмышева А. Ю., Соловьев И. А. Методика пондеромоторного контроля магнитной восприимчивости дисперсных образцов и частиц железосодержащих сорбентов // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 7. С. 602–611. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-602-611.
2. Сандуляк Д. А., Сандуляк А. А., Полисмакова М. Н., Сандуляк А. В., Харин А. С., Соловьев И. А. Оценка критерияльной объемной доли феррочастиц в порошке для контроля магнитных свойств отдельных частиц // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2023. № 2. С. 16–22. DOI: 10.25791/pribor.2.2023.1387.
3. Sandulyak A. A., Sandulyak A. V., Ershova V. et al. Definition of a magnetic susceptibility of conglomerates with magnetite particles. Particularities of defining single particle susceptibility // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. Vol. 441. P. 724–734. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.027.
4. Пат. 2773630 РФ. Способ контроля магнитной восприимчивости частиц по концентрационной зависимости восприимчивости их дисперсных образцов / А. А. Сандуляк, В. А. Ершова, А. В. Сандуляк, М. Н. Полисмакова. Оpubл. 06.06.2022.
5. Сандуляк А. А., Сандуляк Д. А., Полисмакова М. Н., Сандуляк А. В., Ершова В. А., Киселев Д. О. Создание и реализация метода магнитно-реологического контроля магнитной восприимчивости одиночной частицы //

- Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2023. № 5. С. 1–10. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-602-611.
6. Пат. 2753159 РФ. Способ магнитно-реологического контроля магнитной восприимчивости частицы / А. А. Сандуляк, А. В. Сандуляк, В. А. Еришова, Д. А. Сандуляк. Оpubл. 12.08.2021.
 7. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 752 с.
 8. Li W., Zhou L., Han Y., Xu R. Numerical simulation and experimental verification for magnetic field analysis of thread magnetic matrix in high gradient magnetic separation // Powder Technology. 2019. Vol. 355. P. 300–308. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.07.024.
 9. Xue Z., Wang Y., Zheng X., Lu D., Li X. Particle capture of special cross-section matrices in axial high gradient magnetic separation: A 3D simulation // Separation and Purification Technology. 2020. Vol. 237. P. 116375. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116375.
 10. Wu T. H., Mao J. H., Wang J. T., Wu J. Y., Xie Y. B. A New On-Line Visual Ferrograph // Tribology Trans. 2009. Vol. 52. P. 623–631. DOI: 10.1080/10402000902825762.
 11. Baik S. K., Ha D. W., Ko R. K., Kwon J. M. Magnetic field analysis of high gradient magnetic separator via finite element analysis // Physica C. 2012. Vol. 480. P. 111–117. DOI: 10.1016/j.physc.2012.04.036.
 12. Ito D., Nishimura K., Miura O. Removal and recycle of phosphate from treated water of sewage plants with zirconium ferrite adsorbent by high gradient magnetic separation // Journal of Physics: Conf. Series. 2009. Vol. 156. P. 012033. DOI: 10.1088/1742-6596/156/1/012033.
 13. Liu Y.-L., Li D.-W., He J. et al. A periodic magnetic field as a special environment for scientific research created by rotating permanent magnet pair // Rev. of Scientific Instruments. 2018. Vol. 89. P. 105103. DOI: 10.1063/1.5016570.
 14. Zeng J., Tong X., Yi F., Chen L. Selective capture of magnetic wires to particles in high gradient magnetic separation // Minerals. 2019. Vol. 9 (9). P. 509. DOI: 10.3390/min9090509.
 15. Hu K., Sun J., Guo Z. et al. A Novel Magnetic Hydrogel with Aligned Magnetic Colloidal Assemblies Showing Controllable Enhancement of Magnetothermal Effect in the Presence of Alternating Magnetic Field // Advanced Materials. 2015. Vol. 27. P. 2507–2514. DOI: 10.1002/adma.201405757.
 16. Sandulyak A. A., Sandulyak A. V., Polismakova M. N., Kiselev D. O., Ershova V. A., Sandulyak D. A. The Use of Spherical Pole Pieces for Performing the Faraday Balance Method // Instruments and Experimental Techniques. 2018. Vol. 61 (1). P. 123–126. DOI: 10.1134/S0020441218010293.
 17. Пат. 2737609 РФ. Устройство для создания и диагностики зоны стабильной неоднородности магнитного поля / А. А. Сандуляк, А. В. Сандуляк, М. Н. Полисмакова, Д. А. Сандуляк, Д. О. Киселев. Оpubл. 1.12.2020 г.
 18. Пат. 2805765 РФ. Способ магнитно-реологической диагностики магнитной восприимчивости частицы при ее магнитоуправляемом перемещении в жидкости / А. А. Сандуляк, Д. А. Сандуляк, М. Н. Полисмакова, А. В. Сандуляк, А. С. Харин, И. А. Соловьев. Оpubл. 24.10.2023.
 19. Пат. 2813499 РФ. Магнитно-реологический способ определения магнитной восприимчивости частицы / Д. А. Сандуляк, А. А. Сандуляк, В. А. Еришова, А. В. Сандуляк, М. Н. Полисмакова. Оpubл. 12.02.2024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Дарья Александровна Сандуляк

— канд. техн. наук; МИРЭА — Российский технологический университет, кафедра приборов и информационно-измерительных систем; доцент; E-mail: d.sandulyak@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2024; одобрена после рецензирования 02.04.2024; принята к публикации 16.05.2024.

REFERENCES

1. Sandulyak D.A., Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Ershova V.A., Sandulyak A.V., Kurmysheva A.Yu., Solovov I.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 7(66), pp. 602–611, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-602-611. (in Russ.)
2. Sandulyak D.A., Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Sandulyak A.V., Kharin A.S., Solovyov I.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2023, no. 2, pp. 16–22, DOI: 10.25791/pribor.2.2023.1387. (in Russ.)
3. Sandulyak A. A., Sandulyak A. V., Ershova V. et al. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 441, pp. 724–734. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.027.
4. Patent RU 2773630, *Sposob kontrolya magnitnoy vospriimchivosti chastits po kontsentratsionnoy zavisimosti vospriimchivosti ikh dispersnykh obraztsov* (A Method for Monitoring the Magnetic Susceptibility of Particles Based on the Concentration Dependence of the Susceptibility of Their Dispersed Samples), A.A. Sandulyak, V.A. Ershova, A.V. Sandulyak, M.N. Polismakova, Priority 06.06.2022. (in Russ.)

5. Sandulyak A.A., Sandulyak D.A., Polismakova M.N., Sandulyak A.V., Ershova V.A., Kiselev D.O. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2023, no. 5, pp. 1–10, DOI: 10.25791/pribor.5.2023.1406. (in Russ.)
6. Patent RU 2753159, *Sposob magnitno-reologicheskogo kontrolya magnitnoy vospriimchivosti chastitsy* (Method of Magnetic-Rheological Control of the Magnetic Susceptibility of a Particle), A.A. Sandulyak, A.V. Sandulyak, V.A. Ershova, D.A. Sandulyak, Priority 12.08.2021. (in Russ.)
7. Kasatkin A.G. *Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* (Basic Processes and Apparatuses of Chemical Technology), Moscow, 1973, 752 p. (in Russ.)
8. Li W., Zhou L., Han Y., Xu R. *Powder Technology*, 2019, vol. 355, pp. 300–308, DOI: 10.1016/j.powtec.2019.07.024.
9. Xue Z., Wang Y., Zheng X., Lu D., Li X. *Separation and Purification Technology*, 2020, vol. 237, pp. 116375, DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116375.
10. Wu T.H., Mao J.H., Wang J.T., Wu J.Y., Xie Y.B. *Tribology Transactions*, 2009, vol. 52, pp. 623–631, DOI: 10.1080/10402000902825762.
11. Baik S.K., Ha D.W., Ko R.K., Kwon J.M. *Physica C*, 2012, vol. 480, pp. 111–117, DOI: 10.1016/j.physc.2012.04.036.
12. Ito D., Nishimura K., Miura O. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, vol. 156, pp. 012033, DOI: 10.1088/1742-6596/156/1/012033
13. Liu Y.-L., Li D.-W., He J. et al. *Review of Scientific Instruments*, 2018, vol. 89, pp. 105103, DOI: 10.1063/1.5016570.
14. Zeng J., Tong X., Yi F., Chen L. *Minerals*, 2019, no. 9(9), pp. 509, DOI: 10.3390/min9090509.
15. Hu K., Sun J., Guo Z. et al. *Advanced Materials*, 2015, vol. 27, pp. 2507–2514, DOI: 10.1002/adma.201405757.
16. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Kiselev D.O., Ershova V.A., Sandulyak D.A. *Instruments and Experimental Techniques*, 2018, no. 1(61), pp. 123–126, DOI: 10.1134/S0020441218010293.
17. Patent RU 2737609, *Ustroystvo dlya sozdaniya i diagnostiki zony stabil'noy neodnorodnosti magnitnogo polya* (Device for Creating and Diagnosing a Zone of Stable Magnetic Field Inhomogeneity), A.A. Sandulyak, A.V. Sandulyak, M.N. Polismakova, D.A. Sandulyak, D.O. Kiselev, Priority 1.12.2020. (in Russ.)
18. Patent RU 2805765, *Sposob magnitno-reologicheskoy diagnostiki magnitnoy vospriimchivosti chastitsy pri yeye magnitoupravlyayemom peremeshchenii v zhidkosti* (Method for Magnetic-Rheological Diagnostics of the Magnetic Susceptibility of a Particle during Its Magnetically Controlled Movement in a Liquid), A.A. Sandulyak, D.A. Sandulyak, M.N. Polismakova, A.V. Sandulyak, A.S. Kharin, I.A. Solovyov, Priority 24.10.2023. (in Russ.)
19. Patent RU 2813499, *Magnitno-reologicheskiiy sposob opredeleniya magnitnoy vospriimchivosti chastitsy* (Magnetic-Rheological Method for Determining the Magnetic Susceptibility of a Particle), D.A. Sandulyak, A.A. Sandulyak, V.A. Ershova, A.V. Sandulyak, M.N. Polismakova, Priority 12.02.2024. (in Russ.)

DATA ON AUTHOR

Darya A. Sandulyak

— PhD; MIREA — Russian Technological University, Department of Instruments and Information-Measuring Systems; Associate Professor; E-mail: d.sandulyak@mail.ru

Received 22.03.2024; approved after reviewing 02.04.2024; accepted for publication 16.05.2024

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ
НА ОСНОВЕ ФОСФАТНОГО ЭФИРА РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ****Е. Е. Майоров^{1*}, Г. А. Костин², В. В. Курлов¹, Н. Е. Баранов²**

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия

* majorov_ee@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования современных авиационных гидравлических жидкостей на основе фосфатного эфира лабораторным рефрактометром ИРФ „Компакт“. Получены экспериментальные данные по показателю преломления в зависимости от концентрации и температуры растворов исследуемых авиационных гидравлических жидкостей, предназначенные для работы технических служб аэропорта, где необходима высокоточная и достоверная информация о составе и расходе вещества. Приведены оптическая схема и технические параметры измерительного прибора.

Ключевые слова: рефрактометр, авиационная гидравлическая жидкость, концентрация, температурный коэффициент, полином, показатель преломления, аппроксимация

Ссылка для цитирования: Майоров Е. Е., Костин Г. А., Курлов В. В., Баранов Н. Е. Исследование современных авиационных гидравлических жидкостей на основе фосфатного эфира рефрактометрическим методом // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 7. С. 609–614. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-609-614.

**STUDY OF MODERN AVIATION HYDRAULIC FLUIDS BASED ON PHOSPHATE ESTER
BY REFRACTOMETRIC METHOD****E. E. Maiorov^{1*}, G. A. Kostin², V. V. Kurlov¹, N. E. Baranov²**

¹ St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

* majorov_ee@mail.ru

² St. Petersburg State University of Civil Aviation, St. Petersburg, Russia

Abstract. Results of a study of modern aviation hydraulic fluids based on phosphate ester carried out with the use of laboratory refractometer IRF "Compact", are presented. Experimental data on the refractive index depending on the concentration and temperature of the solutions of the studied aviation hydraulic fluids are obtained. Highly accurate and reliable information on the composition and consumption of the substance is necessary for the work of airport technical services. The optical diagram and technical parameters of the measuring device are given.

Keywords: refractometer, aviation hydraulic fluid, concentration, temperature coefficient, polynomial, refractive index, approximation

For citation: Maiorov E. E., Kostin G. A., Kurlov V. V., Baranov N. E. Study of modern aviation hydraulic fluids based on phosphate ester by refractometric method. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 7. P. 609–614 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-609-614.

Введение. В настоящее время существует широкий класс методов и технических средств измерений форм объектов и состава различных сред [1]. Эти методы и технические средства подразделяются на методы разрушающего и неразрушающего контроля [2]. При механическом и химическом взаимодействии происходит изменение формы или состава вещества, которые контролируются соответствующими приборами и комплексами [3]. При использовании методов неразрушающего контроля, к которым относятся оптические и оптико-электронные методы и средства, отсутствуют механические контакты с исследуемыми объектами, а также не изменяется состав газообразной или жидкофазной среды [4].

На сегодняшний день огромное внимание уделяется диагностике и контролю веществ разного агрегатного состояния с использованием методов оптических измерений и соответствующих приборов [5]. Пример таких приборов — лабораторные рефрактометры, обеспечивающие получение достоверных и высокоточных результатов измерений для научных исследований [6].

Для основообразующих ингредиентов авиационных гидравлических жидкостей (АГЖ) класса Туре V марок Скайдрол ПЕ5 и Скайдрол 5, таких как трибутилфосфат и триизобутилфосфат, также необходим соответствующий контроль [7]. Эти АГЖ широко применяются в современных гидроагрегатах и гидросистемах летательных аппаратов для достижения максимальной производительности [8]. Для того чтобы АГЖ сохраняли заявленные свойства (физико-химические), их контроль осуществляется с использованием рефрактометрических технологий. Как известно из физической оптики, рефрактометрические технологии основаны на методе полного внутреннего отражения [9]. Рефрактометрия востребована в производстве, где используется непосредственно в исследуемом потоке и обеспечивает в непрерывном режиме измерения состава вещества и его общий расход. Обзор областей применения рефрактометров показал, что и в лабораторных условиях также стали чаще использоваться данные приборы [10]. Применительно к рассматриваемому вопросу, при исследовании образцов проб использование лабораторных рефрактометров позволяет обеспечить оптимизацию предполетной подготовки (диагностика и контроль АГЖ).

Рефрактометрические технологии, как высокоточный метод оптических измерений, должны обеспечивать получение достоверных данных по оптическим свойствам контролируемых сред, таких как концентрационная и температурная зависимости показателя преломления и средняя дисперсия исследуемых жидкостей [11]. Информация об оптических параметрах приводится научных источниках по авиационным смывкам, противообледенительным авиационным жидкостям и АГЖ [12, 13].

Несомненный интерес представляет исследование растворов АГЖ на основе фосфатного эфира в лабораторных условиях с помощью рефрактометрического измерительного прибора ИРФ „Компакт“ (Россия). Именно этому и посвящена настоящая статья.

Постановка задачи. Используя рефрактометрический метод измерения, найти концентрационную зависимость показателя преломления по мере увеличения концентрации состава авиационной гидравлической жидкости в водном растворе. Выбрав три образца с концентрациями 25, 50 и 75 %, получить графические зависимости показателя преломления от температуры. Вывести результаты для модели раствора исследуемой жидкости в воде как многоингредиентной смеси.

Метод и объекты исследования. Исследованию подлежали растворы жидкофазных многоингредиентных смесей: АГЖ класса Туре V Скайдрол ПЕ5 и Скайдрол 5 на основе фосфатных эфиров. АГЖ относятся к слегка окрашенным жидким средам.

Скайдрол ПЕ5 — жидкость, имеющая специальный состав, что позволяет сохранять необходимую производительность в течение длительного срока [14–16]; эта жидкость зарекомендовала себя в условиях повышенной влажности и высоких температур, к преимуществам относятся также минимальные расходы на техническое обслуживание и объем утилизируемых потерь за счет увеличенного срока службы.

Преимущества Скайдрол 5 — возможность существенной экономии топлива; высокая термическая стабильность; устойчивость к эрозии при высоких температурах; низкая агрессивность к лакокрасочным покрытиям; повышенная огнестойкость по сравнению с жидкостями класса типа IV [14–16].

Лабораторный рефрактометр ИРФ „Компакт“ измеряет показатель преломления при различных концентрациях и температурах исследуемого вещества. Внешний вид прибора показан на рис. 1, а, оптическая схема представлена на рис. 1, б, где 1, 4, 11, 13 — отражающие поверхности, 2 — измерительная призма, 3 — стекло, 5 — осветительная призма, 6 — компенсационное устройство, 7 — собирающая линза, 8 — маркировочная сетка, 9 — окуляр, 10, 15, 16 — поворотные призмы, 12 — объектив, 14 — светофильтр, 17 — шкала.

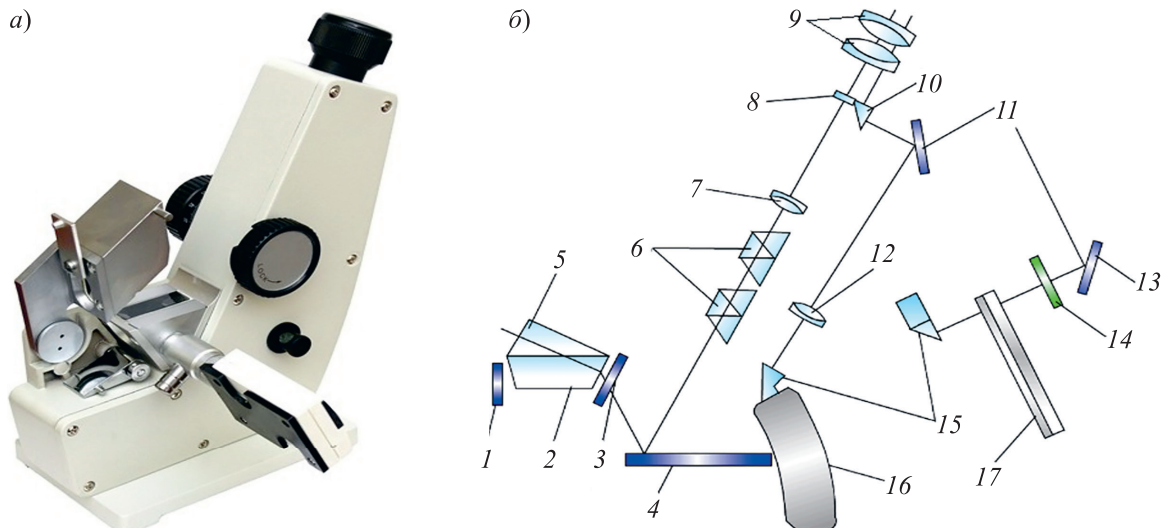


Рис. 1

Основной частью рефрактометра являются две призмы — измерительная 2 и осветительная 5. Между гипотенузными гранями призм вводится исследуемая доза раствора (несколько капель). Осветительная и измерительная призмы соединяются и исследуемая проба распределяется равномерно. Световое излучение направляется зеркалом 4 на компенсатор 6, линзу 7, сетку 8 и окуляр 9. Граница светотени совмещается с перекрестием, штрихи шкалы 17 и отсчетный штрих призмы 10 проецируются оптической системой в фокальную плоскость окуляра.

Технические параметры рефрактометра приведены ниже.

Показатель преломления n_D	1,3...1,7
Массовая доля сухих веществ (сахарозы) в растворе, %	0...5
Погрешность измерений:	
по показателю преломления n_D	$\pm 0,0001$
по средней дисперсии $n_F - n_C$	$\pm 0,00015$
Сходимость n_D , не более	0,00005
Габаритные размеры, мм, не более	$200 \times 80 \times 240$
Масса, кг, не более	2,6

Результаты исследования. Определялся показатель преломления АГЖ на лабораторном рефрактометре ИРФ „Компакт“. Источником излучения был светодиод с длиной волны $\lambda = 633$ нм. Согласно полученным данным показатель преломления растворов АГЖ имеет линейную зависимость от концентрации. Результаты измерения зависимости $n(k)$ для Скайдрол ПЕ5 и Скайдрол 5 по 14 пробам растворов, отличающимся концентрацией, приведены на рис. 2.

Результаты измерений были аппроксимированы полиномами третьей степени, имевшими следующий вид:

$$n(k) = 0,00000009 \cdot k^3 - 0,00002 \cdot k^2 + 0,0028 \cdot k + 1,3233,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9996$ для Скайдрол ПЕ5;

$$n(k) = -0,00000005 \cdot k^3 + 0,000007 \cdot k^2 + 0,0017 \cdot k + 1,3282,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9995$ для Скайдрол 5.

Для исследования влияния температуры на показатель преломления АГЖ необходимо было применить термометр, который входил в состав прибора. Измерения производились с шагом в 1° . Данные для трех образцов Скайдрол ПЕ5 и Скайдрол 5 с концентрациями 25, 50, 75 % и температурой исследуемых сред (20...45 °С) приведены на рис. 3: Скайдрол ПЕ5: 1 — $k = 25$ %, 3 — $k = 50$ %, 5 — $k = 75$ %; Скайдрол 5: 2 — $k = 25$ %, 4 — $k = 50$ %, 6 — $k = 75$ %.

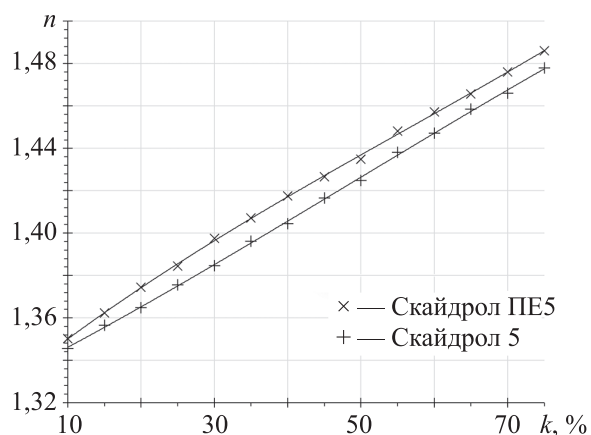


Рис. 2

На рис. 3 видно, что получены линейные зависимости показателя преломления от температуры, которые имеют следующий вид:

— для Скайдрол ПЕ5:

$$n(T) = 0,0003 \cdot T + 1,3906,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9906$ при $k = 25 \%$;

$$n(T) = -0,0004 \cdot T + 1,4426,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9964$ при $k = 50 \%$;

$$n(T) = -0,0006 \cdot T + 1,4974,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9982$ при $k = 75 \%$;

— для Скайдрол 5:

$$n(T) = -0,0002 \cdot T + 1,3804,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,99$ при $k = 25 \%$;

$$n(T) = -0,0003 \cdot T + 1,4321,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9948$ при $k = 50 \%$;

$$n(T) = -0,0004 \cdot T + 1,4871,$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9969$ при $k = 75 \%$.

Согласно уравнениям температурный коэффициент показателя преломления составляет:

— для АГЖ Скайдрол ПЕ5

$$dn/dT = 0,0003 \text{ 1/}^\circ\text{C при } k = 25 \%, \quad dn/dT = -0,0004 \text{ 1/}^\circ\text{C при } k = 50 \%,$$

$$dn/dT = -0,0006 \text{ 1/}^\circ\text{C при } k = 75 \%;$$

— для АГЖ Скайдрол 5

$$dn/dT = -0,0002 \text{ 1/}^\circ\text{C при } k = 25 \%, \quad dn/dT = -0,0003 \text{ 1/}^\circ\text{C при } k = 50 \%,$$

$$dn/dT = -0,0004 \text{ 1/}^\circ\text{C при } k = 75 \%.$$

Сходимость эксперимента с расчетными данными не хуже $\Delta n \leq 0,004$.

Вывод. Проведенные исследования авиационных гидравлических жидкостей последнего поколения рефрактометрическим методом показали, что по мере увеличения показателя преломления наблюдается увеличение концентрации в растворе; при уменьшении показателя преломления зафиксировано увеличение температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишловский А. А. Прикладная физическая оптика. М.: Физматгиз, 1961. 822 с.
2. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии. Л.: Химия, 1983. 352 с.
3. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 1999. 480 с.
4. Курлов В. В., Громов О. В., Таюрская И. С., Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б. Применение разработанного рефрактометрического датчика в пищевом производстве // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 2. С. 1–12.
5. Громов О. В., Майоров Е. Е., Таюрская И. С., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Удахина С. В. Экспериментальное исследование разработанного автоматизированного рефрактометра для контроля химически агрессивных сред // Научное обозрение. Технические науки. 2021. № 3. С. 21–26.
6. Майоров Е. Е., Курлов В. В., Громов О. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Таюрская И. С. Применение рефрактометра для контроля напитков торговой марки „Lipton“ // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 6. С. 170–175.
7. Михальчевский Ю. Ю., Костин Г. А., Майоров Е. Е., Арефьев В. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В. Использование рефрактометрии для обеспечения предполетной подготовки воздушных судов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 10. С. 1–7.
8. Михальчевский Ю. Ю., Костин Г. А., Майоров Е. Е., Курлов В. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В. Оптико-электронный контроль противообледенительных жидкостей для обработки воздушных судов // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 10. С. 170–175.
9. Михальчевский Ю. Ю., Костин Г. А., Майоров Е. Е., Арефьев В. В., Хохлова М. В., Удахина С. В. Исследование противообледенительной жидкости оптоэлектронным рефрактометром // Научное приборостроение. 2021. Т. 31, № 4. С. 88–101.
10. Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Громов О. В., Дагаев А. В., Курлов В. В., Майоров Е. Е., Таюрская И. С. Рефрактометрические средства контроля водных растворов тетрахлорэтилена // Научное приборостроение. 2022. Т. 32, № 2. С. 75–83.
11. Громов О. В., Гулиев Р. Б., Черняк Т. А., Майоров Е. Е., Дагаев А. В., Таюрская И. С. Применение метода полного внутреннего отражения для исследования жидкофазных сред на основе ботулотоксина // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 5. С. 343–349.
12. Майоров Е. Е. Призмная рефрактометрия измерения оптических характеристик каустизационного щелока // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Третья Всерос. науч. конф.: Сб. докл. СПб: ГУАП, 2022. С. 59–61.
13. Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Пушкина В. П., Цыганкова Г. А. Рефрактометрический контроль состава сухого остатка лактицинии в реальном производстве // Приборы. 2023. № 9. С. 10–14.
14. Майоров Е. Е., Курлов В. В., Бородинский Ю. М., Дагаев А. В., Таюрская И. С. Рефрактометрический контроль веществ жидкого агрегатного состояния в пищевой промышленности // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 8. С. 269–274.
15. Арефьев А. В., Афанасьева О. В., Дагаев А. В., Курлов В. В., Майоров Е. Е., Таюрская И. С. Рефрактометрические методы и средства контроля этанола, пропанола и их водных растворов // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 7. С. 594–601.
16. Skydrol. Специальный состав для соответствия постоянно изменяющимся требованиям авиационной промышленности [Электронный ресурс]: https://www.eastman.com/Literature_Center/A/AFRUS009.pdf, 25.11.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; доцент; E-mail: majorov_ee@mail.ru
- Геннадий Александрович Костин** — д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации; кафедра прикладной математики и информатики; проектор по науке и цифровизации, E-mail: g_kostin@mail.ru
- Виктор Валентинович Курлов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; кафедра инноватики и интегрированных систем качества; доцент; E-mail: vitek543@rambler.ru
- Николай Евгеньевич Баранов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, кафедра аэродинамики и динамики полёта, доцент, заведующий кафедрой; E-mail: nbaranov@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.11.2023; одобрена после рецензирования 14.12.2023; принята к публикации 16.05.2024.

REFERENCES

1. Shishlovsky A.A. *Prikladnaya fizicheskaya optika* (Applied Physical Optics), Moscow, 1970, 822 p. (in Russ.)
2. Ioffe B.V. *Refraktometricheskiye metody analiza v khimii* (Refractometric Methods of Analysis in Chemistry), Leningrad, 1983, 351 p. (in Russ.)
3. Yakushenkov Yu.G. *Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov* (Theory and Calculation of Optical-Electronic Devices), Moscow, 1999, 480 p. (in Russ.)
4. Kurlov V.V., Gromov O.V., Tayurskaya I.S., Maierov E.E., Arefyev A.V., Guliyev R.B. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2021, no. 2, pp. 1–12. (in Russ.)
5. Gromov V.O., Maierov E.E., Tayurskaya I.S., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Udakhina S.V. *Scientific Review. Technical Science*, 2021, no. 3, pp. 21–26. (in Russ.)
6. Maierov E.E., Kurlov V.V., Gromov O.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2021, no. 6, pp. 170–175, DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175. (in Russ.)
7. Mikhalevsky Yu.Yu., Kostin G.A., Maierov E.E., Arefyev A.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2021, no. 10, pp. 1–7, DOI: 10.25791/pribor.10.2021.1294. (in Russ.)
8. Mikhalevsky Yu.Yu., Kostin G.A., Maierov E.E., Kurlov V.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2021, no. 10, pp. 134–138, DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175. (in Russ.)
9. Mikhalevsky Y.Y., Kostin G.A., Maierov E.E., Arefyev A.V., Khokhlova M.V., Udachina S.V. *Nauchnoe Priborostroyeniye* (Scientific Instrumentation), 2021, no. 4(31), pp. 88–101. (in Russ.)
10. Arefyev A.V., Guliyev R.B., Gromov O.V., Dagaev A.V., Kurlov V.V., Maierov E.E., Tayurskaya I.S. *Nauchnoe Priborostroyeniye* (Scientific Instrumentation), 2022, no. 2(32), pp. 75–83. (in Russ.)
11. Gromov O.V., Guliyev R.B., Chernyak T.A., Maierov E.E., Dagaev A.V., Tayurskaya I.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 5(65), pp. 343–349, DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-343-349. (in Russ.)
12. Maierov E.E. *Modelirovaniye i situatsionnoye upravleniye kachestvom slozhnykh sistem* (Modeling and Situational Quality Control of Complex Systems), Collection of reports of the Third All-Russian Scientific Conference, St. Petersburg, April 18–22, 2022, pp. 59–61, DOI: 10.31799/978-5-8088-1707-4-2022-3. (in Russ.)
13. Maierov E.E., Arefyev A.V., Guliyev R.B., Pushkina V.P., Tsygankova G.A. *Devices*, 2023, no. 9, pp. 10–14. (in Russ.)
14. Maierov E.E., Kurlov V.V., Borodyansky Yu.M., Dagaev A.V., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2023, no. 8, pp. 269–274.
15. Arefyev A.V., Afanaseva O.V., Dagaev A.V., Kurlov V.V., Maierov E.E., Tayurskaya I.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 7(66), pp. 594–601. (in Russ.)
16. https://www.eastman.com/Literature_Center/A/AFRUS009.pdf. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

Evgeny E. Maierov	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: maierov_ee@mail.ru
Gennady A. Kostin		Dr. Sci., Associate Professor; St. Petersburg State University of Civil Aviation; Department of Applied Mathematics and Informatics; Vice-Rector for Science and Digitalization; E-mail: g_kostin@mail.ru
Viktor V. Kurlov		PhD., Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Innovation and Integrated Quality Systems; E-mail: vitek543@rambler.ru
Nikolay E. Baranov		PhD., Associate Professor; St. Petersburg State University of Civil Aviation; Department of Aerodynamics and Flight Dynamics; Head of the Department; E-mail: nbaranov@yandex.ru

Received 27.11.2023; approved after reviewing 14.12.2023; accepted for publication 16.05.2024

УДК 681.382
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-615-621

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО
ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ ПАНАРИЦИИ МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОЙ ГИПОТЕРМИИ

О. В. Евдулов, А. М. Ибрагимова*, З. М. Дайзиев

Дагестанский государственный технический университет, Махачкала, Россия

** ibrasya@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается термоэлектрическое устройство для лечения панариция методом локальной гипотермии пораженного участка пальца. Описана конструкция прибора, проведены его экспериментальные исследования. Согласно результатам исследований для реализации методики локальной гипотермии при лечении панариция термоэлектрическое устройство в полной мере обеспечивает необходимые режимы теплового воздействия. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показывает, что их отличие составляет 7–8 %.

Ключевые слова: термоэлектрическое устройство, термоэлектрический модуль, панариций, лечение, локальная гипотермия, температура, опытный образец, экспериментальный стенд, измерение

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-00130; <https://rscf.ru/project/23-29-00130/>.

Ссылка для цитирования: Евдулов О. В., Ибрагимова А. М., Дайзиев З. М. Термоэлектрическое устройство для лечения панариция методом локальной гипотермии // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 7. С. 615–621. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-615-621.

THERMOELECTRIC DEVICE FOR THE TREATMENT OF PANARITUM BY LOCAL HYPOTHERMIA

O. V. Yevdulov, A. M. Ibragimova*, Z. M. Daiziev

Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russia

** ibrasya@mail.ru*

Abstract. A thermoelectric device for treating panaritia by local hypothermia of the affected area of the finger is considered. The design of the device is described, and its experimental studies are conducted. According to the results of the studies, the thermoelectric device fully provides the necessary thermal action modes for implementing the local hypothermia technique in treating panaritia. Comparison of theoretical and experimental data shows that their difference is 7–8%.

Keywords: thermoelectric device, thermoelectric module, panaritia, treatment, local hypothermia, temperature, prototype, experimental stand, measurement

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-29-00130; <https://rscf.ru/project/23-29-00130/>.

For citation: Yevdulov O. V., Ibragimova A. M., Daiziev Z. M. Thermoelectric device for the treatment of panaritia by local hypothermia. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 7. P. 615–621 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-615-621.

Введение. В практике лечения воспалительных и гнойных заболеваний большой процент составляют поражения тканей пальцев человека, так называемый панариций и его разновидности. Доля пациентов с этим заболеванием достигает 30 % [1] относительно общего количества больных с воспалительными и гнойными процессами. Эта проблема особенно важна вследствие высокой частоты ее возникновения, длительной нетрудоспособности больного и нередко неблагоприятных функциональных результатов лечения [2]. Использование медикаментозных методов, ориентированных в основном на применение антибиотиков, во многих случаях является недостаточно эффективным из-за приспособляемости микроорганизмов внутри раны и снижения иммунореактивности макроорганизма. При использовании хирургических методов лечения часто требуется проведение повторных операций, наблюдаются неблагоприятные функциональные и эстетические исходы.

В этих условиях в медицинской практике при лечении разновидностей панариция на первый план выходят физиотерапевтические методы, такие как гидромассаж, фонофорез, гальванизация, электрофорез, ультрафиолетовое и сверхвысокочастотное излучение, лазерная терапия, лечение магнитным полем и ультразвуком, тепловое воздействие [3, 4]. При этом последняя из перечисленных процедур, связанная с локальным прогреванием пораженного участка различными средствами, часто применяется на ранних стадиях панариция в сочетании с медицинскими препаратами. Несмотря на эффективность такого метода лечения, он сопровождается побочными эффектами — отеками воспаленных тканей пальцев, усилением застойных явлений в очаге воспаления, ухудшением микроциркуляции крови и лимфы. Другим возможным вариантом теплового воздействия при лечении панариция является локальная гипотермия пораженной области. В отличие от нагрева, в этом случае все перечисленные побочные эффекты сводятся к нулю, а сама процедура обладает хорошим этиопатогенетическим лечебным эффектом.

При этом следует отметить, что техническое обеспечение данного метода лечения панариция является недостаточным. В лечебной практике для его реализации на сегодняшний день применяются лишь различного рода холодные компрессы, аппликации льда, холодные ванны, криогели и криоаэрозоли, что не позволяет обеспечить точность проведения тепловых процедур и необходимую длительность воздействия, „комфортность“ восприятия процедур пациентами. В этой связи для проведения локальной гипотермии пальцев целесообразна разработка новых устройств с высокими эксплуатационными показателями. По основным массогабаритным, надежностным и энергетическим показателям для создания подобных приборов подходят устройства на основе термоэлектрических модулей, работающих в режиме охлаждения [5–10].

В настоящей статье представлены результаты разработки и исследования термоэлектрического устройства (ТЭУ) для лечения панариция методом локальной гипотермии с использованием экспериментальных методов.

Материалы и методы. Конструкция ТЭУ для лечения панариция представлена на рис. 1: *а* — вид сверху, *б* — вид прибора в разрезе. В состав ТЭУ входит корпус 1, по боковым поверхностям имеющий вентиляционные отверстия 2, емкость для лечебного раствора 3 и подставку 4 грибовидной формы для кисти с возможностью регулирования ее высоты с помощью ножки 5. В корпусе также расположены металлические стаканы 6, внешней поверхностью сопряженные с холодными спаями термоэлектрических модулей (ТЭМ) 7, горячие спаи которых контактируют с пластинчатым радиатором 8. Вентиляторный агрегат 9 предназначен для обдува пластинчатого радиатора. Емкость с лечебным раствором 3 соединена с металлическими стаканами 6 посредством соединительных трубопроводов 10, 11 и 12. ТЭМ запитываются электрической энергией от регулируемого источника постоянного электрического тока.

При проведении лечебных процедур кисть пациента располагается на подставке 4, причем ее высота регулируется посредством ножки 5 таким образом, чтобы пальцы находились в металлических стаканах 6. Далее емкость 3 заполняется лечебным раствором, в качестве которого используется, например, раствор перманганата калия. За счет соединительных трубопроводов 10, 11 и 12 лечебный раствор из емкости 3 попадает в металлические стаканы 6. После

начала работы источника постоянного электрического тока ТЭМ 7 начинают охлаждать лечебный раствор в металлических стаканах и соответственно помещенные в них фаланги пальцев с пораженными панарицием областями. Пластинчатый радиатор 8 и вентиляторный агрегат 9 осуществляют отвод тепла от горячих спаев ТЭМ с тем, чтобы обеспечить необходимую продолжительность проведения медицинских процедур.

Были проведены экспериментальные исследования описанной конструкции ТЭУ в целях определения его параметров и экспериментальной проверки влияния конструктивных, теплофизических и режимных факторов на характеристики устройства, а также оценки точности созданной ранее математической модели прибора [4]. Математическая модель ТЭУ для лечения панариция методом местной гипотермии [4] реализована на основе решения задачи нестационарной теплопроводности для многослойного тела со сложной геометрией. Произведен расчет температурного поля структуры, включающей в себя область пальца, находящегося в стакане с лечебным раствором, охлаждаемым ТЭМ, стакана и лечебного раствора. Расчет выполнен с использованием численного метода конечных элементов в пакете прикладных программ Elcut. Результаты вычислений получены в виде двумерных и одномерных графиков изменения температуры в пространственных и временных координатах для различных значений холодопроизводительности ТЭМ и внешних факторов. На основе картины изменения температуры структуры ТЭУ — биологического объекта воздействия — определены значения требуемой холодопроизводительности ТЭМ, а также их тип с соответствующими электрическими и геометрическими характеристиками, параметры системы отвода тепла с горячих спаев модулей.

Экспериментальные исследования ТЭУ проводились в климатической камере, температура внутри которой составляла 296 К, относительная влажность 40 %. В качестве источников холода использовались два стандартных ТЭМ типа ТВ-63-1.0-2.0 (производитель — ООО „Криотерм“, Россия [11]) для каждого металлического стакана. Питание ТЭМ осуществлялось источником электрической энергии GPR-1850HD (производитель — GW Instek, Тайвань [12]). Для проведения измерений использовались встроенные в источник электрической энергии амперметр и вольтметр, а также многоканальный измеритель температуры ИРТМ 2402/М3Ех-2 (производитель — компания НПП „Элемер“, Россия [13]), подключаемый к ПЭВМ. Непосредственно определение температуры осуществлялось медь-константановыми термопарами, подключаемыми к входу прибора РТМ 2402/М3Ех-2. В качестве контрольных точек рассматривались поверхности холодных и горячих спаев ТЭМ, поверхность первой фаланги пальца и поверхность пластинчатого радиатора.

Обсуждение результатов. На рис. 2 представлена временная зависимость изменения температуры в перечисленных выше контрольных точках ТЭУ при работе ТЭМ в режиме охлаждения для значения тока питания (I) последнего, равного 1,8 А. Согласно представленным данным изменение температуры поверхности холодных спаев ТЭМ и поверхности первой фаланги пальца (кривые 1, 2 соответственно) носит монотонный убывающий характер, а температура поверхности горячих спаев ТЭМ и пластинчатого радиатора (кривые 2, 4) монотонно возрастает до своей стабилизации. По достижении данного состояния температура поверхности холодных спаев ТЭМ составляет 280 К, горячих спаев ТЭМ — 324 К, первой фаланги пальца — 287 К, пластинчатого радиатора — 318 К. При этом температура холодных и горячих спаев ТЭМ стабилизируется относительно быстро, в течение примерно 150 с, продолжительность выхода

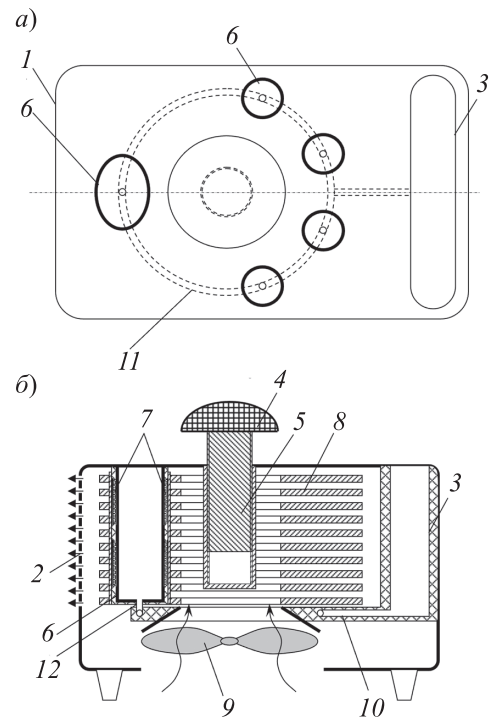


Рис. 1

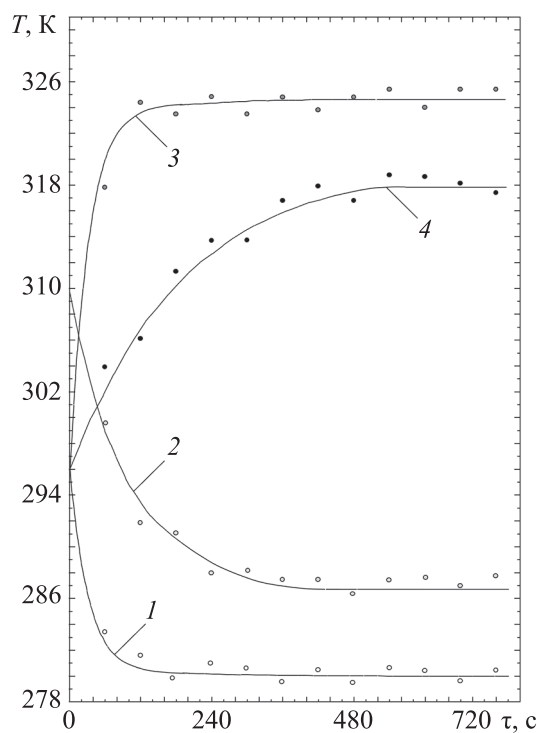


Рис. 2

в первоначальный момент эксплуатации прибора, т. е. использования режима максимальной холодопроизводительности. Другой вариант сокращения продолжительности выхода системы на необходимый температурный уровень — включение устройства до проведения медицинских процедур с целью вывода прибора на требуемый уровень охлаждения и уже затем проведение процедуры. В этом случае время выхода на требуемый режим работы ТЭУ существенно уменьшится. В соответствии с результатами работы [15] разница составит примерно 1,3 раза.

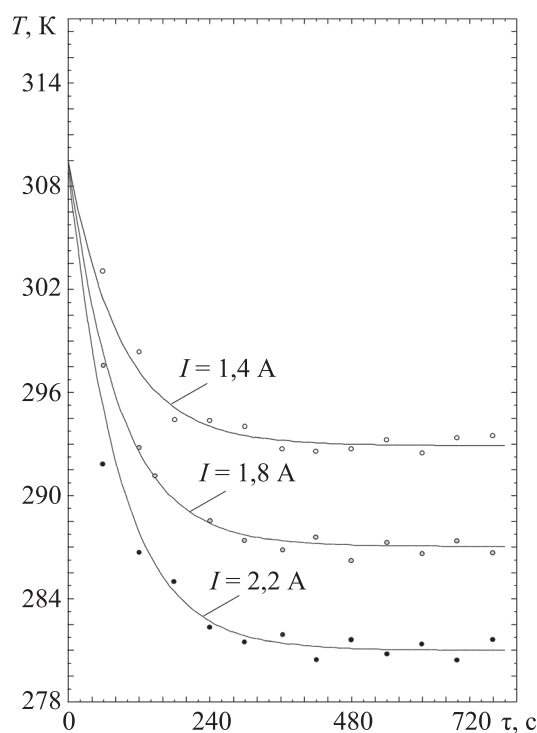


Рис. 3

в стационарный режим температуры первой фланги пальца составляет 420 с, а пластинчатого радиатора — 520 с. Данное обстоятельство непосредственно связано с размерами объектов, значениями их теплопроводности и теплоемкости, а также наличием между пальцем и холодной поверхностью металлического стакана, охлаждаемого ТЭМ, лечебного раствора.

Изменение во времени температуры поверхности первой фланги пальца при различных значениях тока питания ТЭМ, равных 1,4, 1,8 и 2,2 А, продемонстрировано на рис. 3. Согласно приведенным зависимостям увеличение значения I приводит к уменьшению температуры поверхности первой фланги пальца, что равносильно увеличению холодопроизводительности термомодулей. Так, увеличение тока с 1,4 до 2,2 А снижает ее температуру с 293 до 281 К, что в полной мере реализует существующие лечебные методики, связанные с локальной гипотермией пальцев при лечении панариция [14]. При этом сократить продолжительность выхода системы ТЭУ (объекта воздействия) в стационарный режим можно путем использования форсированного режима работы

Надежность функционирования устройства существенно зависит от эффективного отвода тепла от горячих спаев ТЭМ. На рис. 4, а для оценки возможностей пластинчатого радиатора с обдувом посредством вентиляторного агрегата для отвода тепла от горячих спаев термомодулей представлены данные об изменении его температуры во времени при охлаждающем воздействии и значениях тока питания ТЭМ, равных 1,4, 1,8 и 2,2 А, а на рис. 4, б — аналогичные графики для температуры поверхности горячих спаев ТЭМ. Согласно данным зависимостям следует вывод, что температура горячих спаев ТЭМ не превышает 326 К для максимального значения тока питания 2,2 А данного типа термомодулей, а пластинчатый радиатор может обеспечивать надежную работу ТЭУ на протяжении всего времени проведения лечебных процедур.

По результатам измерений произведено сопоставление полученных результатов с вычислениями. На графиках (см. рис. 2–4) помимо данных измерений, изображенных точками, представлены также и результаты вычислений в виде сплошных кривых. Сопоставление первых и вторых показывает

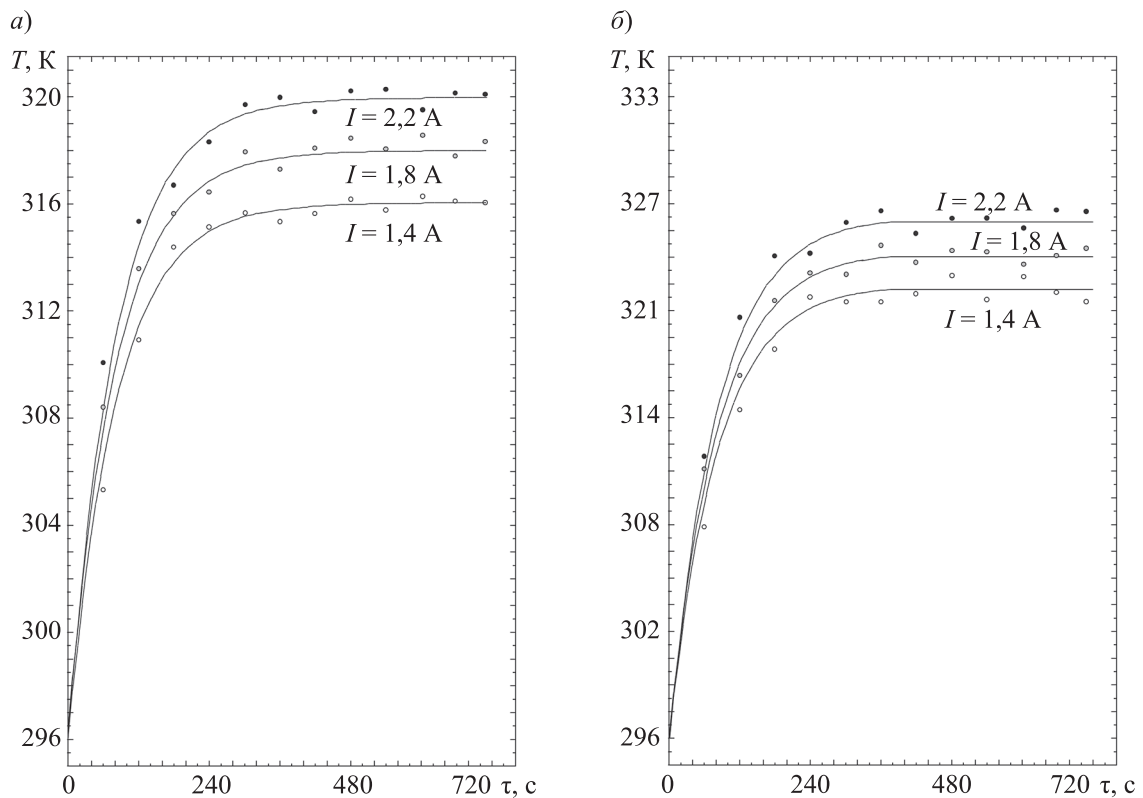


Рис. 4

их хорошую корреляцию. При этом максимальное расхождение результатов эксперимента и расчета составляет 7–8 %. Отклонение результатов моделирования от результатов измерений связано с неидеальностью условий проведения последних (наличие теплопритоков, неидеальность контактов, как тепловых, так и электрических, в структуре ТЭУ, погрешности измерения некоторых параметров), неточностью измерительных приборов и принятыми в математической модели упрощениями.

Закключение. Для лечения панариция эффективным методом является локальная гипотермия пораженной области. Для осуществления данной процедуры разработана конструкция ТЭУ, корпус которого содержит 5 встроенных металлических стаканов, при проведении процедур наполняемых лечебным раствором и охлаждаемых ТЭМ, пластинчатый радиатор и вентиляторный агрегат для отвода тепла от горячих спаев термомодулей. Разработан опытный образец прибора, в состав которого входят десять ТЭМ типа ТВ-63-1.0-2.0. Проведены его экспериментальные исследования, согласно которым для реализации методики локальной гипотермии при лечении панариция ТЭУ в полной мере обеспечивает необходимые режимы теплового воздействия. При этом потребляемый электрический ток составляет 1,2...2,2 А, а время выхода температуры объекта воздействия (пальца) в стационарный режим 420 с. Для обеспечения стабильной работы устройства достаточным является использование пластинчатого радиатора с обдувом его вентиляторным агрегатом. При сопоставлении теоретических и экспериментальных данных установлено, что их отличие составляет 7-8 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сонис А. Г., Столяров Е. А., Алексеев Д. Г., Безрукова М. А. Гнойно-воспалительные заболевания пальцев кисти и стопы (введение в проблему) // Московский хирургический журнал. 2020. № 1 (71). С. 62–69.
2. Баранов Д. А., Вечеркин В. А., Птицын В. А., Коряшкин П. В., Жила Н. Г. Проблема неудовлетворительных результатов лечения детей с гнойно-воспалительными заболеваниями кисти // Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии. 2023. Т. 13, № 5. С. 22.

3. Чепурная Ю. Л., Мелконян Г. Г., Гульмурадова Н. Т., Сорокин А. А. Развитие комплексного лечения гнойно-воспалительных заболеваний кисти при использовании лазерного излучения // *Лазерная медицина*. 2021. Т. 25, № 1. С. 55–64.
4. Евдулов О. В., Евдулов Д. В., Исабекова Т. И., Аминов Г. И., Аминова И. Ю. Математическая модель термоэлектрического устройства для лечения панариция методом местной гипотермии // *Медицинская техника*. 2022. № 2 (332). С. 51–54.
5. Snyder G. J., LeBlanc S., Crane D. et al. Distributed and localized cooling with thermoelectrics // *Future Energy*. 2021. Vol. 5. P. 748–751.
6. Исмаилов Т. А., Евдулов О. В., Магомадов Р. А.-М. Охлаждающие системы на базе сильноточных термоэлектрических полупроводниковых преобразователей. СПб: Политехника, 2020. 285 с.
7. Hu B., Shi X.-L., Chen Z.-G., Zou J. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives // *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 437. P. 135268.
8. Zaferani S. H., Ghomashchi R., Sams M. W., Chen Z.-G. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement // *Nano energy*. 2021. Vol. 90. P. 106572.
9. Finn P.-A., Asker C., Wan K. et al. Thermoelectric materials: current status and future challenges // *Frontiers in Electronic Materials*. 2021. Vol. 1. P. 1–13.
10. Tan H., Fu H., Yu J. Evaluating optimal cooling temperature of a single-stage thermoelectric cooler using thermodynamic second law // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 123. P. 845–851.
11. <http://www.kryotherm.spb.ru>, 01.04.2024.
12. <https://www.gwinstek.com/en-global/products/index>, 01.04.2024.
13. <https://www.elemer.ru/>, 01.04.2024.
14. Красенков Ю. В., Татьяначенко В. К., Манулик Н. А., Эдилов А. В., Давыденко А. В., Богданов В. Л. Профилактика гипертрофических рубцов у больных гнойно-воспалительными заболеваниями мягких тканей // *Московский хирургический журнал*. 2024. № 1. С. 78–84.
15. Евдулов О. В., Магомадов Р. А.-М., Мирземагомедова М. М., Мирземагомедов Р. Г., Аминов Г. И. Термоэлектрическая система для теплового воздействия на конечности человека // *Медицинская техника*. 2022. № 2 (332). С. 1–4.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- | | |
|--------------------------------------|---|
| Олег Викторович Евдулов | — д-р техн. наук, доцент; Дагестанский государственный технический университет, кафедра теоретической и общей электротехники;
E-mail: ole-ole-ole@rambler.ru |
| Асият Магомедовна Ибрагимова | — соискатель; Дагестанский государственный технический университет, кафедра теоретической и общей электротехники;
E-mail: ibrasya@mail.ru |
| Запир Магомеднабиевич Дайзиев | — аспирант; Дагестанский государственный технический университет, кафедра теоретической и общей электротехники;
E-mail: zapir1977@mail.ru |

Поступила в редакцию 05.04.2024; одобрена после рецензирования 13.04.2024; принята к публикации 16.05.2024.

REFERENCES

1. Sonis A.G., Kolyarov E.A., Alekseyev D.G., Besrukova M.A. *Moscow Surgical Journal*, 2020, no. 1(71), pp. 62–69. (in Russ.)
2. Baranov D.A., Vecherkin V.A., Ptitsyn V.A., Koryashkin P.V., Zhila N.G. *Russian Journal of Pediatric Surgery, Anesthesia and Intensive Care*, 2023, no. 5(13), pp. 22. (in Russ.)
3. Chepurnaya Y.L., Melkonyan G.G., Gulmuradova N.T., Sorokin A.A. *Lazernaya Medicina*, 2021, no. 1(25), pp. 55–64. (in Russ.)
4. Yevdulov O.V., Yevdulov D.V., Isabekova T.I., Aminov G.I., Aminova I.Yu. *Biomedical Engineering*, 2022, no. 2(332), pp. 146–150.
5. Snyder G.J., LeBlanc S., Crane D. et al. *Future energy*, 2021, vol. 5, pp. 748–751.
6. Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Magomadov R.A.-M. *Okhlazhdayushchiye sistemy na baze sil'notochnnykh termoelektricheskikh poluprovodnikovyykh preobrazovateley* (Cooling Systems Based on High-Current Thermoelectric Semiconductor Converters), St. Petersburg, 2020, 285 p. (in Russ.)
7. Hu B., Shi X.-L., Chen Z.-G., Zou J. *Chemical engineering journal*, 2022, vol. 437, p. 135268.
8. Zaferani S.H., Ghomashchi R., Sams M.W., Chen Z.-G. *Nano energy*, 2021, vol. 90, p. 106572.

9. Finn P.-A., Asker C., Wan K. et al. *Frontiers in electronic materials*, 2021, vol. 1, pp. 1–13.
10. Tan H., Fu H., Yu J. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 123, pp. 845–851.
11. <http://www.kryotherm.spb.ru>. (in Russ.)
12. <https://www.gwinstek.com/en-global/products/index>. (in Russ.)
13. <https://www.elemer.ru/>. (in Russ.)
14. Krasenkov Yu.V., Tatyanchenko V.K., Manulik N.A., Edilov A.V., Davydenko A.V., Bogdanov V.L. *Moscow Surgical Journal*, 2024, no. 1, pp. 78–84. (in Russ.)
15. Yevdulov O.V., Magomadov R.A.M., Mirzemagomedova M.M., Mirzemagomedov R.G., Aminov G.I. *Biomedical Engineering*, 2022, no. 2(332), pp. 79–83.

DATA ON AUTHORS

- | | |
|-----------------------------|--|
| Oleg V. Yevdulov | — Dr. Sci., Associate Professor; Dagestan State Technical University, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; E-mail: ole-ole-ole@rambler.ru |
| Asiyat M. Ibragimova | — Applicant; Dagestan State Technical University, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; E-mail: ibrasya@mail.ru |
| Zapir M. Daiziev | — Post-Graduate Student; Dagestan State Technical University, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; E-mail: zapir1977@mail.ru |

Received 05.04.2024; approved after reviewing 13.04.2024; accepted for publication 16.05.2024

ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВКИ ПРЯМОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

М. А. Коробков

Московский авиационный институт, Москва, Россия

josef_turok@bk.ru

Аннотация. Исследуется возможность применения лабораторного прототипа установки прямого экспонирования, использующего жидкокристаллическую (ЖК) матрицу для формирования топологии на фоточувствительном материале, для компенсации деформации печатных плат (ПП) в процессе их производства. Рассмотрены существующие способы оценки деформации ПП — предложен метод компенсации деформации на этапе экспонирования на основе метода контроля совмещаемости топологических слоев. Для предложенного метода определены упрощающие его реализацию допущения. Произведена аппаратная модернизация лабораторного образца установки путем добавления контура обратной связи в виде видеокамеры, предоставляющей информацию о положении ПП на рабочем поле. Определены элементы подготовки установки к работе. Разработан и протестирован алгоритм генерации изображений для отображения на ЖК-матрице.

Ключевые слова: производство печатных плат, деформация печатных плат, прямое экспонирование, цифровой фотошаблон, надежность технологических процессов производства печатных плат

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-10204.

Ссылка для цитирования: Коробков М. А. Применение установки прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы для компенсации деформации печатных плат // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 7. С. 622–632. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-622-632.

APPLICATION OF THE DIRECT EXPOSURE UNIT BASED ON LS-MATRIX FOR COMPENSATION OF PRINTED CIRCUIT BOARDS DEFORMATION

M. A. Korobkov

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

josef_turok@bk.ru

Annotation. The possibility of using a laboratory prototype of a direct exposure setup using a liquid crystal (LC) matrix to form a topology on a photosensitive material to compensate for printed circuit board (PCB) deformation during their production is investigated. Existing methods for assessing PCB deformation are considered — a method for compensating for deformation at the exposure stage based on the method of controlling the compatibility of topological layers is proposed. Assumptions simplifying its implementation are defined for the proposed method. The hardware upgrade of the laboratory prototype of the setup was performed by adding a feedback loop in the form of a video camera providing information on the PCB position on the working field. Elements of preparing the setup for operation are defined. An algorithm for generating images for display on the LCD matrix is developed and tested.

Keywords: PCB manufacturing, PCB deformation, direct exposure, digital photomask, reliability of PCB manufacturing processes

Acknowledgments: the work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-29-10204.

For citation: Korobkov M. A. Application of the direct exposure unit based on LS-matrix for compensation of printed circuit boards deformation. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 7. P. 622–632 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-622-632.

Введение. При производстве печатной платы (ПП) над заготовкой совершается ряд операций, таких как сверление, травление медной фольги, прессование и т. д. [1–3], в результате которых она деформируется. На рис. 1, *а* показана величина, характеризующая влияние различных технологических операций на значение деформации, которое количественно может быть выражено разбросом положения координат элементов проводящего рисунка относительно заложенного при проектировании. Деформация влечет за собой критичные для плат высокого класса точности последствия, например, значительное рассовмещение элементов проводящего рисунка на слоях друг относительно друга (рис. 1, *б*). Опасность данного явления заключается и в том, что оно трудно прогнозируется и практически не контролируется. Известны методические рекомендации [4, 5], применение которых на этапе конструирования печатного узла позволяет уменьшить негативное влияние деформации, однако их соблюдения уже недостаточно для ПП высокого класса точности (с пятого и выше согласно ГОСТ Р 53429-2009).

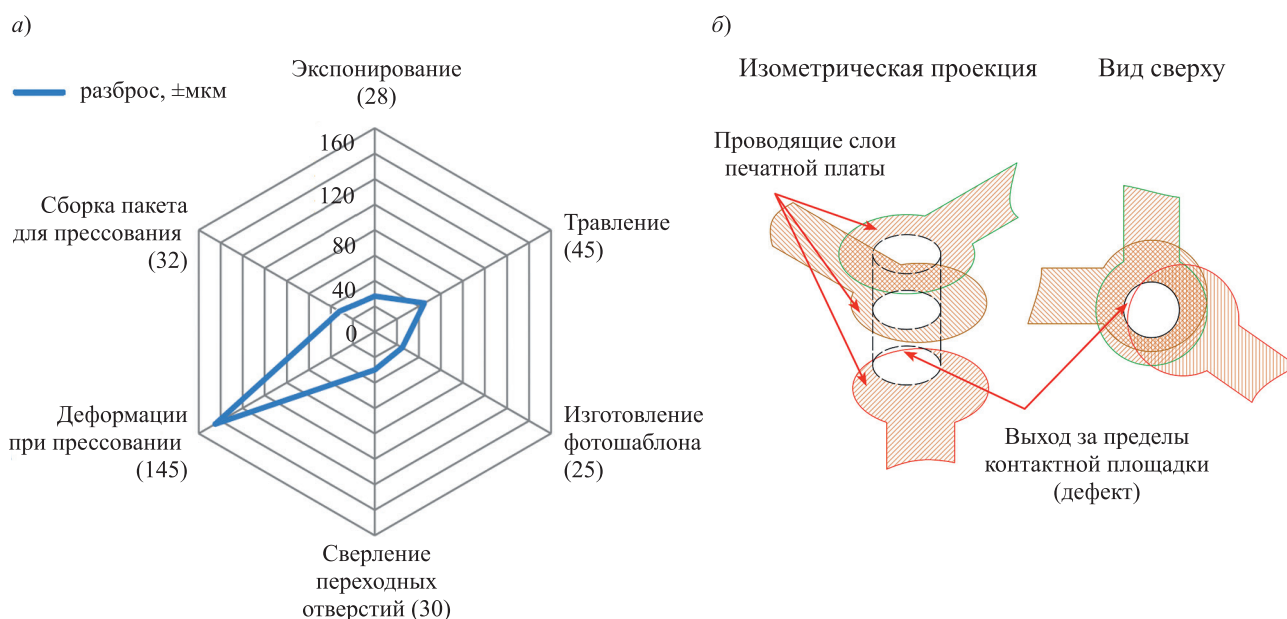


Рис. 1

Существуют исследования, позволяющие получить априорную оценку смещения элементов топологии проводящего рисунка [6, 7], что делает возможным внедрение в производственный процесс корректирующих воздействий для компенсации деформации, например, изменение топологии проводящего слоя на этапе конструирования или процесса технологической подготовки производства. Одной из потенциальных операций технологического процесса производства ПП, когда можно компенсировать деформацию, является экспонирование — формирование проводящего рисунка на поверхности заготовки.

В целом для разработки и исследования методов уменьшения влияния деформации при производстве ПП можно использовать любую систему экспонирования [8, 9], однако недостатки существующих установок затрудняют решение этой задачи. Основным недостатком установок контактного экспонирования — использование физических фотошаблонов, что влечет за собой сложность быстрого изменения топологии при проведении экспериментов, большое количество расходов на изготовление и хранение фотошаблонов, трудоемкость позиционирования фотошаблонов в силу зависимости их параметров от окружающей среды — температуры и влажности. Системы прямого экспонирования являются более предпочтительным вариантом для внедрения элементов компенсации деформации, так как имеют возможность изменять воспроизводимый рисунок программными методами, но такие установки дороги и труднодоступны.

Таким образом, для исследования методов компенсации деформации требуется дешевая и доступная установка экспонирования, которая позволит формировать изображение без фотошаблонов, что обеспечит возможность внесения корректировок в трассировку. В результате

исследований [10, 11] разработан прототип установки (рис. 2: *а* — модуль экспонирования, *б* — общий вид), использующий монохромную жидкокристаллическую (ЖК) матрицу для селективного пропускания света от источника излучения к фоточувствительному материалу (фоторезисту) и формирования рисунка топологии. Проведенные эксперименты подтвердили возможность получения на лабораторном стенде топологии, соответствующей четвертому классу точности по ГОСТ Р 53429-2009. Иными словами, установка, при низкой цене ее комплектующих, может быть конкурентоспособным аналогом систем экспонирования в классах опытного и мелкосерийного производства.

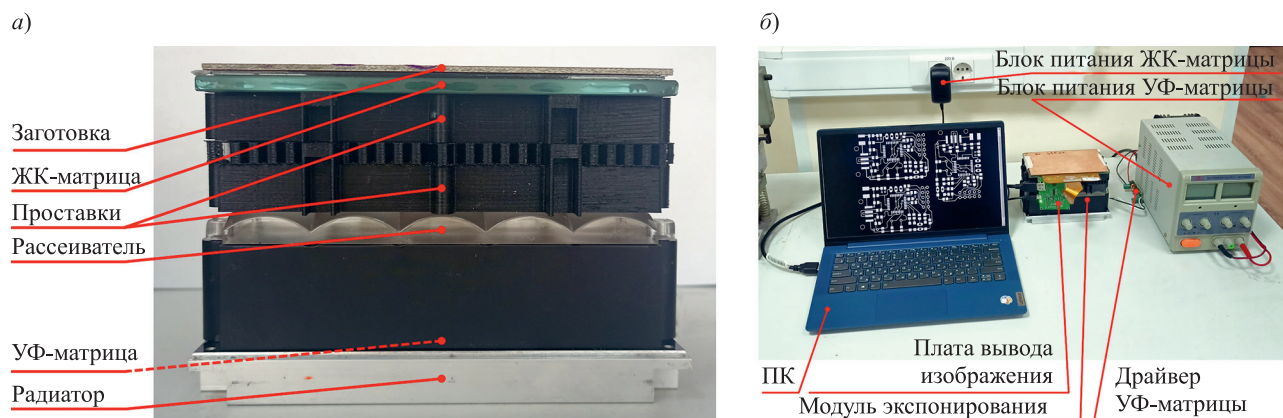


Рис. 2

Для исследования возможности компенсации деформации слоев с использованием данной установки необходимо:

- 1) определить возможные для реализации на этапе экспонирования способы компенсации деформации печатных плат;
- 2) внедрить систему обратной связи, позволяющую определить положение заготовки на рабочем поле установки;
- 3) определить составляющие процесса подготовки установки к работе: требуемые файлы проекта ПП и перечень необходимых операций.

Способы определения деформации ПП и возможность их применения на этапе экспонирования. Задача компенсации деформации слоев ПП тесно связана с задачей обеспечения совмещения элементов соединений в трехмерных печатных структурах, которой посвящено достаточно много работ, охватывающих проблему с разных сторон.

В [12, 13] определена суммарная погрешность совмещения элементов соединений в виде прикладной математической модели факторного анализа вероятности пространственного совмещения элементов соединений в трехмерных структурах многослойных печатных плат (МПП) А. М. Медведева. Модель основана на использовании вероятностного метода расчета плоских размерных цепей и учитывает деформационные процессы, происходящие с заготовками МПП, но позволяет только оценить возможность изготовления ПП на конкретном производстве и рассчитать надежность в зависимости от сложности конструкции.

В [14] отклонения координат печатных элементов и монтажных отверстий относительно номинальных положений являются следствием трех групп погрешностей: позиционирования рабочих органов технологического оборудования, совмещения и базирования плат на сверлильном станке, изменения координат печатных элементов на фотошаблонах и слоях вследствие размерной нестабильности фотопленок и тонких фольгированных диэлектриков. По результатам экспериментов определено, что при изготовлении ПП происходит изменение координат печатных элементов, но эта погрешность носит случайный характер.

Метод контроля совмещаемости топологических слоев, состоящий в разложении рассовмещений на отдельные составляющие, каждая из которых характеризует влияние того или иного фактора или их совокупностей, изложен в [15]. Основой для дифференцированной оценки

отдельных составляющих являются математические модели погрешностей совмещения, описывающие распределение погрешностей по полю топологического слоя. Рассовмещение в каждой точке платы представляется в виде совокупности составляющих: смещения, неортогональности, углового разворота, растяжения или сжатия и случайных факторов. При этом от точки к точке изменение рассовмещения будет изменяться систематическим образом, и если найти способ выделять в измеренных рассовмещениях отдельные составляющие, то можно определить способы для их устранения.

В [16, 17] предложен вариант развития метода контроля совмещаемости топологических слоев в виде методики компенсации деформации на этапе сверления. Методика подразумевает определение новых координат сверления переходных отверстий в ПП на основе проективных преобразований группы Ли (рис. 3, а: сплошная линия — эталон, штриховая — реальная заготовка). Таким образом, имея информацию о координатах четырех точек на эталоне (проект ПП) и реальной заготовке, можно определить функциональную связь между ними, которую можно использовать для определения новых координат сверления:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где x, y — координаты точки на эталоне; x', y' — координаты точки на заготовке ПП; $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2$ — коэффициенты матрицы преобразования.

Также предполагается возможность использования метода, если точек измерения на плате больше четырех, путем образования нескольких простых областей, описываемых четырьмя точками (рис. 3, б).

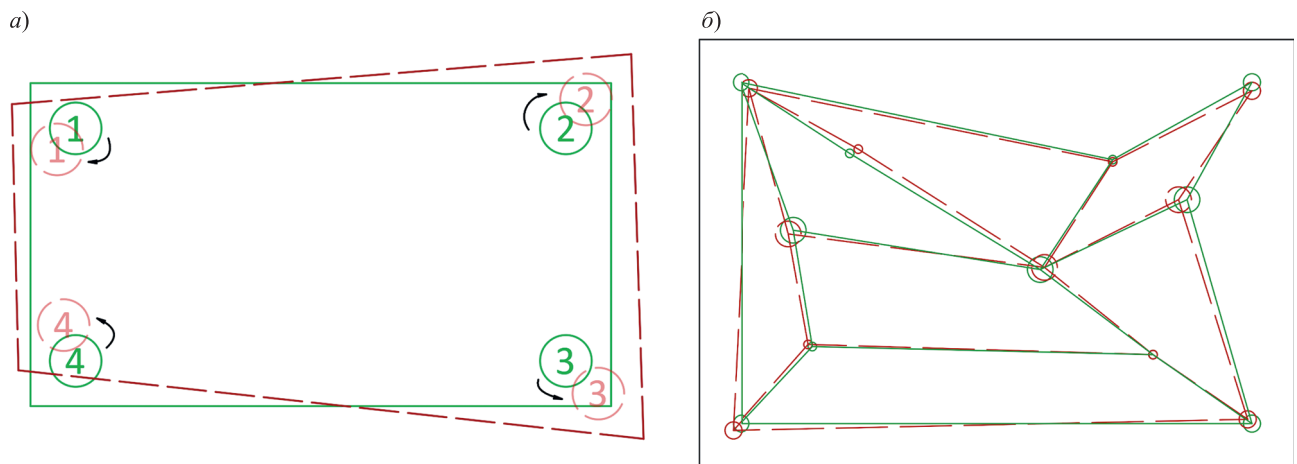


Рис. 3

Использование описанного метода возможно на этапе экспонирования, при этом в качестве точек для определения матрицы преобразования могут выступать как технологические отверстия на заготовке или специальные реперные знаки, так и все отверстия на ПП. Это возможно в случае, если операция экспонирования происходит после операции сверления, как, например, при тентинг-методе изготовления печатных плат. Тогда информация о расположении реперных знаков может быть получена с помощью системы компьютерного зрения. Однако использование этого метода требует дополнительного исследования в следующих случаях:

- определения фигуры для разбиения поверхности ПП — в качестве базового элемента для разбиения могут быть использованы не только четырехугольники, но и треугольники;
- определения количества и вида реперных знаков, так как они сами могут являться источниками погрешности;
- определения метода сегментации поверхности заготовки.

Предложенный метод можно использовать в качестве базы для компенсации деформации ПП, поскольку его применение в полной мере ограничено отсутствием информации о расположении координат эталонных точек на реальной заготовке. Использование в качестве реперных знаков только элементов на технологическом поле заготовки не позволит компенсировать деформацию сложного характера, появление которой возможно на ПП.

В [18] показано, что значение и направление вектора деформации зависит от многих факторов, в частности от топологии проводящего слоя, и предложена эмпирическая конечно-элементная модель для определения этих параметров. Оценка влияния топологии на величину деформации позволяет сделать вывод, что информации о смещении реперных знаков недостаточно для определения деформации во всех точках ПП и ее требуется дополнить вычисленными значениями на основе анализа проводящего рисунка. Однако также не определена возможность использования вычисленных параметров напрямую, т. е. влияние изменения проводящего рисунка непосредственно на вычисленную величину, так как такое действие может привести к другим значениям деформации вместо ее компенсации. Поэтому данный вопрос также требует экспериментального исследования, а анализ полученных результатов может быть осуществлен с помощью элементов машинного обучения [19].

Таким образом, для компенсации деформации ПП на этапе экспонирования возможно использовать метод контроля совмещаемости топологических слоев, дополненный информацией о деформации заготовки, полученной системой компьютерного зрения. Для практического исследования возможности компенсации предлагается на начальном этапе вместо проективных использовать аффинные преобразования:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В качестве реперных знаков предлагается использовать все отверстия на ПП — в таком случае влияние случайных ошибок определения их координат на значения коэффициентов матрицы преобразования будет незначительным, однако проекционные искажения останутся некомпенсированными.

Доработка конструкции установки экспонирования. Для реализации выбранного способа компенсации деформации требуется доработка лабораторной установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы, а именно внедрение контура обратной связи, предоставляющего информацию о положении заготовки. Реализация такого контура осуществлена на базе модуля видеокамеры (далее — камеры) с сенсором Sony IMX298 с программно настроенным разрешением 3264×2448 , которое сопоставимо с разрешением ЖК-матрицы — 3840×2400 . Для монтажа камеры на установку использован модуль вертикального перемещения 3D-принтера Anycubic Photon, а также спроектированы и изготовлены крепежный узел для камеры и основание установки. Плотное прилегание заготовки к ЖК-матрице в данном варианте обеспечивается механически. Схема и фотография прототипа доработанного модуля экспонирования приведены на рис. 4, а, б.

Далее определяется необходимая высота h камеры относительно ЖК-матрицы (рис. 5) по следующей формуле:

$$h = \frac{L}{2\operatorname{tg}(\varepsilon/2)}, \quad (3)$$

где L — размер рабочей области ЖК-матрицы (134,4 и 84 мм); ε — угол обзора камеры (86° по обеим осям).

Выражение (3) задает минимальную высоту, при которой ЖК-матрица может поместиться на изображении, формируемом видеокамерой. Требуемая высота по двум осям составляет 72 и 44 мм. Из двух полученных значений выбрано максимальное. С учетом запаса высота камеры над ЖК-матрицей составляет 75 мм. Модуль вертикального перемещения позволяет увеличить качество формируемого изображения путем подстройки положения и фокуса камеры под размеры заготовки.

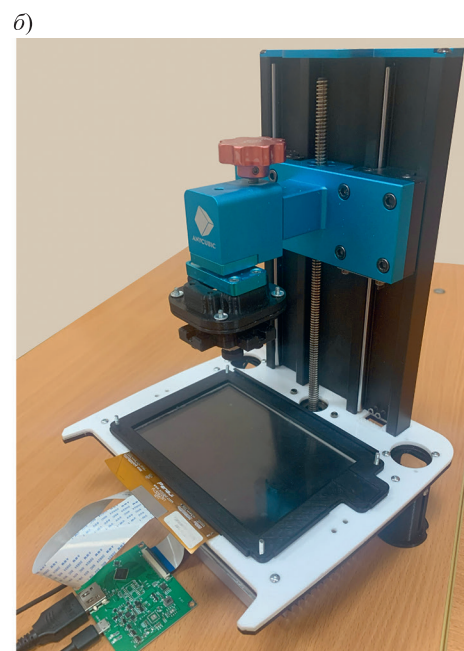
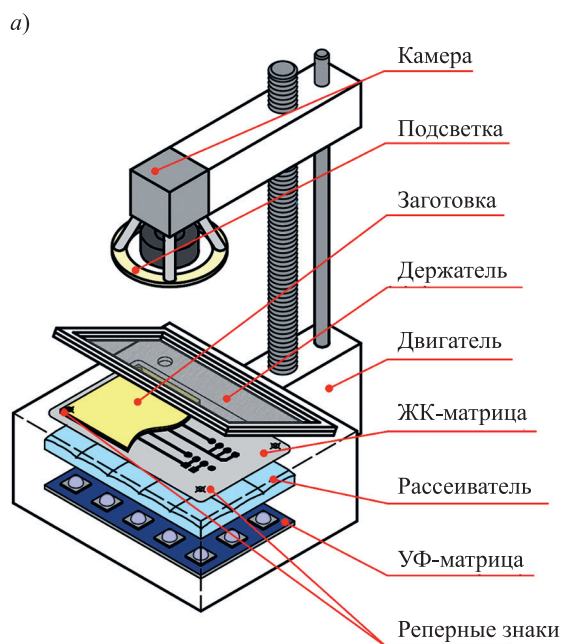


Рис. 4

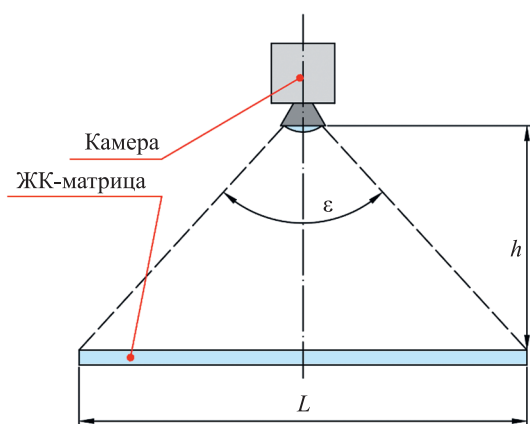


Рис. 5

Таким образом, установка оснащена контуром обратной связи на основе камеры, предоставляющим информацию о положении заготовки на ЖК-матрице, что позволяет перейти к определению составляющих процесса подготовки установки к работе.

Подготовка установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы к работе. Основным компонентом технологической подготовки установки к работе является процесс преобразования производственных файлов проекта печатной платы в изображения слоев, которые корректно будут отображаться на ЖК-матрице — генерация (рис. 6).

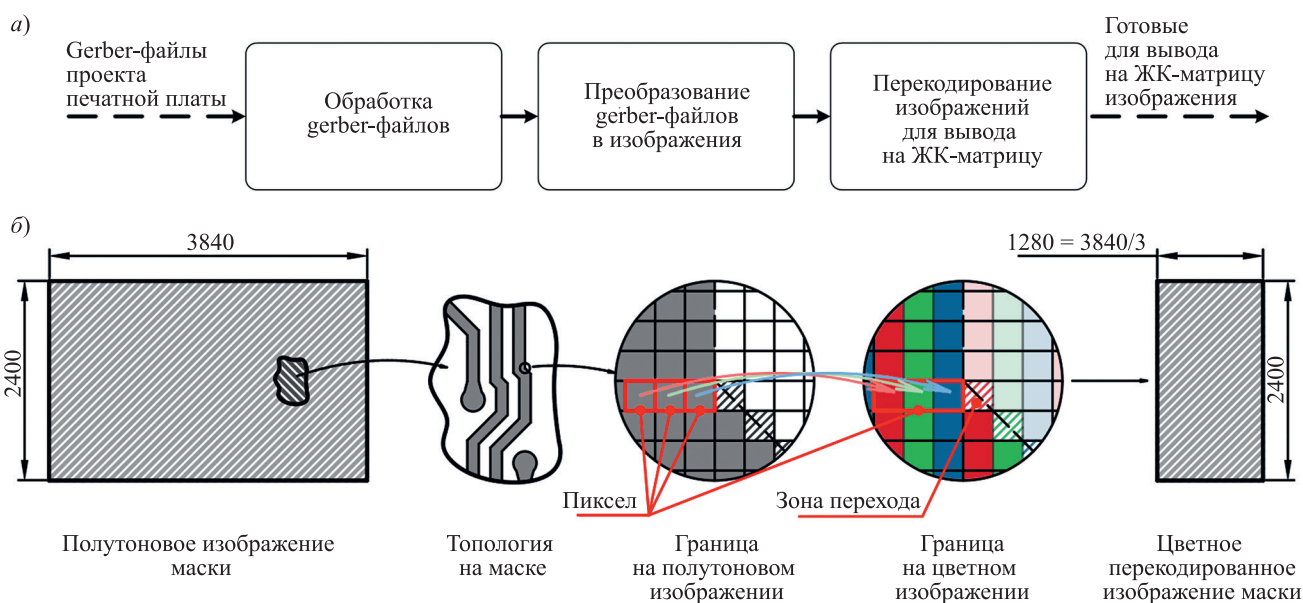


Рис. 6

Создание необходимых для производства изображений осуществляется на основе gerber-файлов проекта ПП и состоит из следующих этапов (рРис. 6, а).

1. *Обработка gerber-файлов.* Задачей этапа является подготовка файлов для их корректного преобразования в изображения, что главным образом обеспечивается соответствием их разрешения (3840×2400) и разрешающей способности ЖК-матрицы. Разрешающая способность ЖК-матрицы определена через размер пиксела ($34,6 \times 34,6$ мкм) и составляет около 734 точек на дюйм. Для обеспечения соответствия параметров изображений и ЖК-матрицы в gerber-файлы ПП добавлена окаймляющая проводящий рисунок рамка, размер которой соответствует размеру рабочей области установки ($134,4 \times 84$ мм). По рамке будет осуществляться обрезка сгенерированного изображения.

2. *Преобразование gerber-файлов в изображения.* Реализация этого этапа преимущественно производится с помощью набора модулей для рендеринга gerber-файлов pcb-tools 0.1.6 [20], разработанного на языке программирования Python. Набор модулей позволяет преобразовать gerber-файл в изображение формата png с заданным разрешением.

3. *Перекодирование изображения для вывода на ЖК-матрицу* (см. рРис. 6, б). ЖК-матрица определяется формирующим изображением компьютером как цветной монитор с разрешением 1280×2400 , в котором каждый пиксел состоит из красного, зеленого и синего субпикселов. Поэтому отображение изображения с разрешением 3840×2400 будет осуществляться некорректно. Так как матрица монохромная, то каждый субпиксел можно считать отдельным пикселом. Для корректного отображения: определен порядок следования субпикселов в пикселе (красный—зеленый—синий); сгенерированное изображение переведено в полутоновое, т. е. все субпикселы объединены в один пиксел; полутоновое изображение переведено обратно в цветное таким образом, чтобы один пиксел в качестве субпикселов содержал три пиксела полутонового изображения в определенном ранее порядке.

На рис. 7 приведен пример подготовки изображения топологии с минимальной шириной проводников и зазоров 0,15 мм (сформированное из gerber-файла, а, и перекодированное, б, изображения), а также изображение рабочего поля установки, сформированное камерой при отображении на ЖК-матрицу перекодированного изображения (в) и результат экспонирования (г) после проявки (при экспонировании использован фоторезист Ordyl AM 140 толщиной 40 мкм). На перекодированном изображении выделен увеличенный участок, на котором отображено, что в одном цветном пикселе содержатся три отдельных пиксела (см. рис. 7, б).

На изображении с камеры указаны увеличенные участки, полученные с помощью микроскопа (см. рРис. 7, в), которые использованы для визуальной оценки качества сгенерированного шаблона. Точность операции экспонирования на установке зависит от физического размера пиксела на ЖК-матрице. При растеризации топологии возможны ошибки в зонах перехода между прозрачными и затемненными участками (см. рРис. 6, б). Тогда точность воспроизведения проводящего рисунка может быть определена как размер стороны пиксела ($34,6$ мкм) для вертикальных и горизонтальных проводников, а для диагональных проводников — как диагональ пиксела ($48,9$ мкм).

Еще одним элементом подготовки установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы является процесс совмещения шаблона с заготовкой, который состоит из двух этапов:

— подготовительный этап — калибровка установки, заключающаяся в определении матрицы перехода „камера — ЖК-матрица“ между отображаемым на ЖК-матрице и формируемым камерой изображением; выполнение операции калибровки не требуется при каждом запуске установки, а только в случае изменения положения камеры относительно рабочего поля установки;

— основной этап — позиционирование шаблона на рабочем поле установки на основе информации с камеры о положении заготовки, для которого определяется матрица перехода „ЖК-матрица — заготовка“; осуществляется генерация и отображение изображения проводящего рисунка.

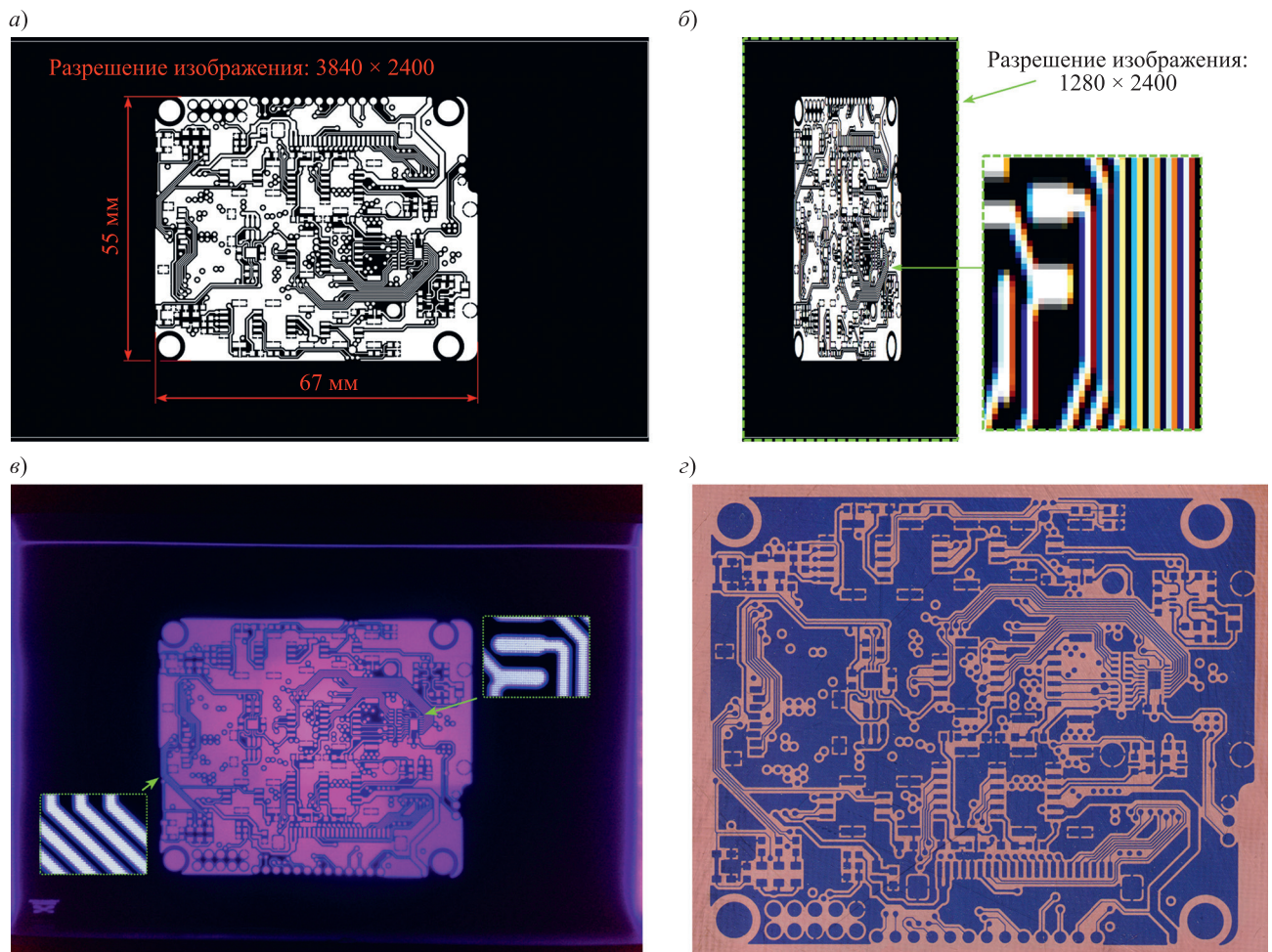


Рис. 7

Изображения до перекодирования (см. рис. 7, а) можно использовать для компьютерного анализа изображений при калибровке и совмещении с применением методов компьютерного зрения и теории распознавания образов, имеющих программную реализацию в наборе модулей OpenCV [21–23].

Алгоритм подготовки к работе установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы представлен на рис. 8.

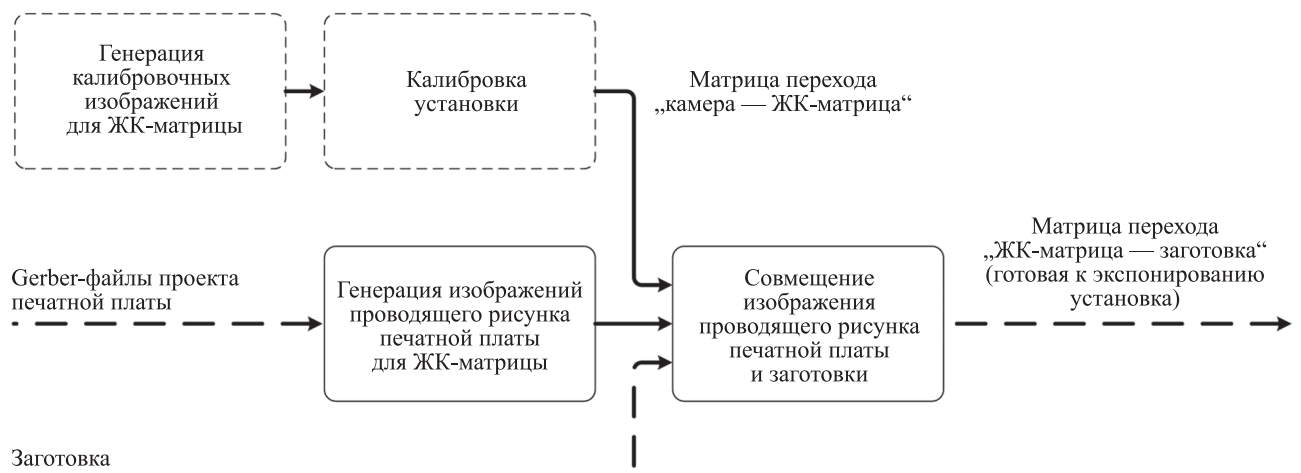


Рис. 8

Таким образом, в разработанный алгоритм подготовки установки к работе возможно включение методов компенсации деформации заготовки на этапе совмещения изображения топологии с заготовкой, что требует более детального рассмотрения этапов калибровки и совмещения: определения их составляющих, а также возможностей и алгоритмов их реализации на лабораторном образце установки.

Заключение. Исследованы возможности использования установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы для задач компенсации деформации ПП.

1. Рассмотрены способы оценки деформации печатной платы — для компенсации деформации ПП на этапе экспонирования наиболее применим подход, основанный на методе контроля совмещаемости топологических слоев. Метод предполагает определение матрицы перехода на основе сопоставления эталона и изображения заготовки в процессе производства. Для проверки работоспособности подхода предложено использовать в качестве реперных знаков отверстия на ПП и ограничить математическую модель деформации аффинными преобразованиями без проекционных искажений.

2. Произведена аппаратная модернизация установки прямого экспонирования — внедрен контур обратной связи на основе системы перемещения 3D-принтера Anycubic Photon и камеры Sony IMX298.

3. Определен алгоритм подготовки к работе установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы, который включает в себя три основные операции: генерацию набора изображений для отображения на ЖК-матрице, калибровку положения камеры, совмещение изображения проводящего рисунка и заготовки. Разработан алгоритм генерации изображений, а также проведено его тестирование путем переноса на фоторезист проводящего рисунка с минимальными размерами проводника и зазора 0,15 мм.

Также в ходе исследования определена необходимость в разработке и программной реализации двух этапов: калибровки — для определения связи между формируемыми камерой и отображаемыми на ЖК-матрице изображениями; совмещения — для определения необходимого преобразования отображаемого на ЖК-матрице изображения в соответствии с положением заготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vasilyev F. V., Medvedev A. M., Barakovskiy F. A., Korobkov M. A. Development of the Digital Site for Chemical Processes in the Manufacturing of Printed Circuit Boards // *Inventions*. 2021. N 6 (3). P. 48. DOI: 10.3390/inventions6030048.
2. Бараковский Ф., Ванцов С., Васильев Ф. Струйный метод получения проводящего рисунка печатной платы // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2020. № 3 (194). С. 108–113.
3. Медведев А. М., Сокольский А. М. Технологическое обеспечение надежности электрической изоляции электронных сборок авионики // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2015. № 11. С. 41–44.
4. Бегер Е. Практические способы уменьшения деформаций печатных плат на этапе конструирования // *Компоненты и технологии*. 2009. № 1. С. 116–119.
5. Ванцов С., Хомутская О., Лийн Е. Влияние конструктивных параметров на плоскую деформацию печатных плат // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2023. № 8 (229). С. 108–113.
6. Никитин С., Поздняков К., Хомутская О. Оценка деформации печатных плат // *Производственные технологии*. 2019. № 5. С. 144–150.
7. Khomutskaya O. V., Medvedev A. M., Korobkov M. A., Vancov S. V. The Method of Automated Evaluation of the Deformation of the Printed Circuit Board // *Proc. – ICOECS 2021: Intern. Conf. on Electrotechnical Complexes and Systems*. 2021. P. 510–512. DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657420.
8. Васильев Ф. В. Физическая надежность электроники. М.: МАИ, 2022. 160 с.
9. Платы печатные: Справочник / Под ред. К. Ф. Кумбза. М.: Техносфера, 2011. Кн. 1. 1016 с.
10. Коробков М. А., Зайкин В. Д., Мареичев Е. С., Хомутская О. В., Васильев Ф. В. Система прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы // *Научное приборостроение*. 2023. № 33 (1). С. 65–85.
11. Коробков М. А., Зайкин В. Д. Метод масочной компенсации неравномерности излучения в системе прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы // *Тр. МАИ*. 2023. № 132.

12. Крылов С. А., Медведев А. М., Сержантов А. М. Развитие технологии межсоединений универсальных высокопроизводительных ЭВМ // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ. 1989. № 7. С. 9–19.
13. Медведев А. М. Технологическое обеспечение надежности соединений в печатных платах // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 6 (6). С. 48–51.
14. Иевлев В. И. Анализ точности производства электронных средств: Учеб. пособие. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2010. 103 с.
15. Цветков Ю. Б. Управление топологической точностью фотолитографии: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 174 с.
16. Можаров В. А. Математическая модель пространственного совмещения элементов межсоединений в многослойных структурах авионики // Тр. МАИ. 2013. № 65. С. 36.
17. Можаров В. А. Обеспечение пространственного совмещения элементов межсоединений в многослойных печатных структурах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2013.
18. Хомутская О. В. Разработка методики и алгоритмов автоматизированной оценки деформации в многослойных печатных структурах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2019.
19. Chen I.-C., Hwang R.-C., Huang H.-C. PCB Defect Detection Based on Deep Learning Algorithm // Processes. 2023. N 11. P. 775. DOI: 10.3390/pr11030775.
20. Набор программных модулей pcb-tools 0.1.6. [Электронный ресурс]: <https://pypi.org/project/pcb-tools/>, 01.03.2024.
21. Максимов Н. А., Склеймин Ю. Б., Шаронов А. В. Программный комплекс построения маршрута движения беспилотного авиационного комплекса при его перебазировании в зону действия // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23, № 3. С. 102–111.
22. Максимов Н. А., Малюта Е. В., Шаронов А. В. Система автоматизированного учета повреждений воздушного судна, зафиксированных при предполетном осмотре // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22, № 4. С. 85–90.
23. Максимов А. Н., Александров А. А., Романов В. Д. Метод чтения кадров с видеокамер и реализации алгоритмов обработки видеоизображений в программах на языках стандарта IEC 61499 // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 4. С. 96–98.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Максим Андреевич Коробков

— аспирант; Московский авиационный институт, кафедра цифровых технологий и информационных систем; ст. преподаватель;
E-mail: josef_turok@bk.ru

Поступила в редакцию 22.03.2024; одобрена после рецензирования 11.04.2024; принята к публикации 16.05.2024.

REFERENCES

1. Vasilyev F.V., Medvedev A.M., Barakovsky F.A., Korobkov M.A. *Inventions*, 2021, no. 3(6), pp. 48, DOI: 10.3390/inventions6030048.
2. Barakovsky F., Vantsov S., Vasiliev F. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2020, no. 3(194), pp. 108–113. (in Russ.)
3. Medvedev A.M., Sokolsky A.M. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2015, no. 11, pp. 41–44. (in Russ.)
4. Beger E. *Components and technologies*, 2009, no. 1, pp. 116–119. (in Russ.)
5. Vantsov S., Khomutskaya O., Liin E. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2023, no. 8(229), pp. 108–113. (in Russ.)
6. Nikitin S., Pozdnyakov K., Khomutskaya O. *Proizvodstvennyye tekhnologii*, 2019, no. 5, pp. 144–150. (in Russ.)
7. Khomutskaya O.V., Medvedev A.M., Korobkov M.A., Vancov S.V. *Proceedings – ICOECS 2021: 2021 Intern. Conf. on Electrotechnical Complexes and Systems*, 2021, pp. 510–512, DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657420.
8. Vasiliev F.V. *Fizicheskaya nadezhnost' elektroniki* (Physical Reliability of Electronics), Moscow, 2022, 160 p. (in Russ.)
9. Coombs C.F. *Printed Circuits Handbook*, McGraw-Hill Companies, 2008.
10. Korobkov M.A., Zaikin V.D., Mareichev E.S., Khomutskaya O.V., Vasiliev F.V. *Nauchnoe Priborostroyenie* (Scientific Instrumentation), 2023, no. 1(33), pp. 65–85. (in Russ.)
11. Korobkov M.A., Zajkin V.D. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. (in Russ.)
12. Krylov S.A., Medvedev A.M., Serzhantov A.M. *Voprosy radioelektroniki. Seriya EVT*, 1989, no. 7, pp. 9–19. (in Russ.)
13. Medvedev A.M. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 2005, no. 6 (6), pp. 48–51 (in Russ.)
14. Ievlev V.I. *Analiz tochnosti proizvodstva elektronnykh sredstv* (Analysis of the Accuracy of Electronic Production), Ekaterinburg, 2010, 103 p. (in Russ.)
15. Tsvetkov Yu.B. *Upravleniye topologicheskoy tochnost'yu fotolitografii* (Control of Topological Accuracy of Photolithography), Moscow, 2005, 174 p. (in Russ.)
16. Mozharov V.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 65, pp. 36. (in Russ.)

17. Mozharov V.A. *Obespecheniye prostranstvennogo sovmeshcheniya elementov mezhsoyedineniy v mnogosloynnykh pechatnykh strukturakh* (Ensuring Spatial Alignment of Interconnection Elements in Multilayer Printed Structures), Candidate's thesis, Moscow, 2013, 149 p. (in Russ.)
18. Khomutskaya O.V. *Razrabotka metodiki i algoritmov avtomatizirovannoy otsenki deformatsii v mnogosloynnykh pechatnykh strukturakh* (Development of Methods and Algorithms for Automated Assessment of Deformation in Multilayer Printed Structures), Candidate's thesis, Moscow, 2019. (in Russ.)
19. Chen I.-C., Hwang R.-C., Huang H.-C. *Processes*, 2023, no. 11, pp. 775, <https://doi.org/10.3390/pr11030775>.
20. <https://pypi.org/project/pcb-tools/>. (in Russ.)
21. Maximov N., Skleymin Yu., Sharonov A. *Aerospace MAI Journal*, 2016, no. 3(23), pp. 102–111. (in Russ.)
22. Maximov N., Malyuta E., Sharonov A. *Aerospace MAI Journal*, 2015, no. 4(22), pp. 85–90. (in Russ.)
23. Maximov A.N., Alexandrov A.A., Romanov V.D. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2022, no. 4, pp. 96–98. (in Russ.)

DATA ON AUTHOR

Maksim A. Korobkov

— Post-Graduate Student; Moscow Aviation Institute, Department of Digital Technologies and Information Systems; Senior Lecturer;
E-mail: josef_turok@bk.ru

Received 27.11.2023; approved after reviewing 14.12.2023; accepted for publication 16.05.2024