

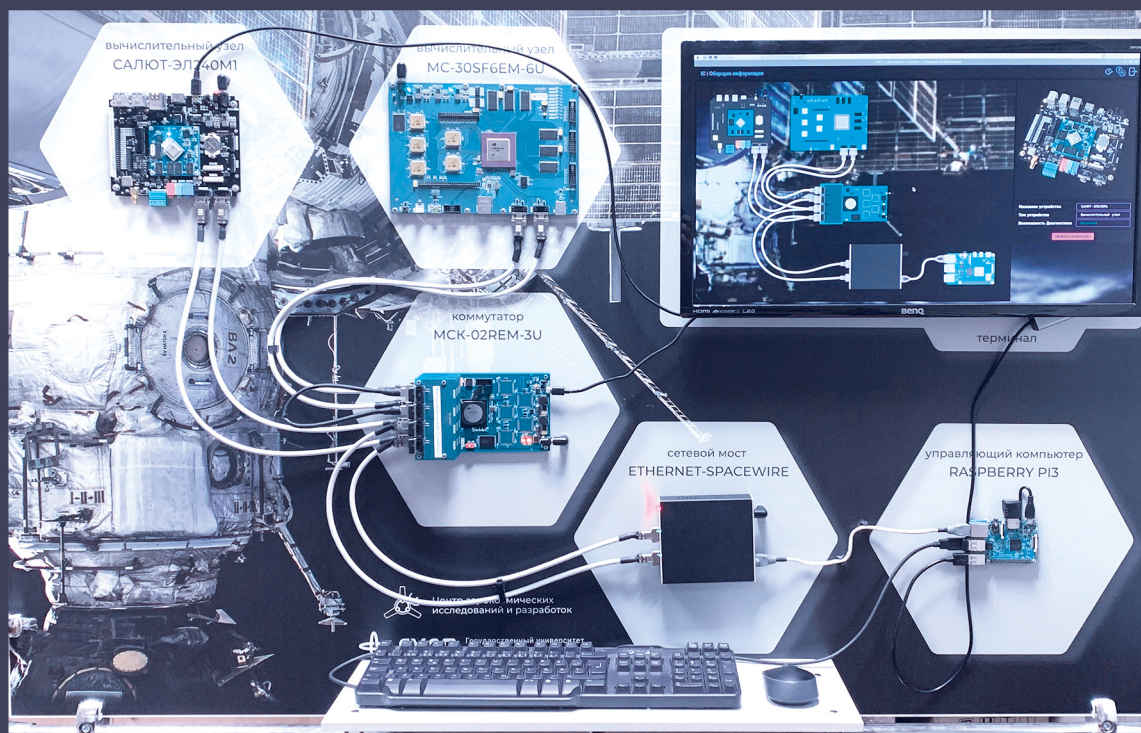
ISSN 2949-0693

ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 3, № 1 • 2024

INNOVATIVE INSTRUMENTATION





ГУАП

Санкт-Петербургский
государственный
университет
аэрокосмического
приборостроения

ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 3, № 1 • 2024

INNOVATIVE INSTRUMENTATION

Scientific Journal

Vol. 3, no. 1 • 2024



SUAI

Saint Petersburg
State University
of Aerospace
Instrumentation

Innovative Instrumentation

Founded in 2022

Founder

Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Publisher

Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Chief Editor

E. A. Frolova,
D. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor,
Director at the Institute of Fundamental
Training and Technological Innovation,
Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Deputy Chief Editor

S. A. Nazarevich,
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor

Executive Secretary

V. A. Tushavin,
D. Sc. in Technical Sciences

Editorial Board

A. R. Bestugin, D. Sc., Prof.
A. S. Budagov, D. Sc., Assoc. Prof.
N. A. Zhilnikova, D. Sc., Assoc. Prof.
M. L. Krichevsky, D. Sc., Prof.
N. N. Maiorov, D. Sc., Assoc. Prof.
A. V. Nebylov, D. Sc., Prof.
A. O. Smirnov, D. Sc., Assoc. Prof.
T. M. Tatarnikova, D. Sc., Prof.
V. A. Tushavin, D. Sc.
V. G. Farafonov, D. Sc., Prof.
E. A. Frolova, D. Sc., Assoc. Prof.
V. F. Shishlakov, D. Sc., Prof.

Scientific Journal

The journal was registered in the Federal Service for
Supervision of Communications, Information Technology
and Mass Media (Roskomnadzor),
PI no. FS 77-83496 from June, 24, 2022

Publication frequency: 6 issues per year

The journal's pages are open for discussion
materials; its content does not necessarily reflect
the views of the founder and the editorial board.

Reprinting of publications from the journal
"Innovative Instrumentation" to foreign editions
is allowed by agreement with the editorial board.

Reference to the journal "Innovative Instrumentation"
is mandatory.

Editorial and publisher's address

The Editorial and Publishing Center,
SUAI, 67, lit. A, Bolshaya Morskaya str.,
Saint Petersburg, 190000, Russian Federation
Tel.: (812) 494-70-69
E-mail: ip@guap.ru
Website: <https://guap.ru/inps>

Editorial Council

Yu. A. Antokhina, D. Sc., Prof.
A. V. Demidov, D. Sc., Prof.
V. V. Ivanov, D. Sc., RAS Corr. Member
G. A. Korzhavin, D. Sc., Prof.
A. A. Ovodenko, D. Sc., Prof.
V. V. Okrepilov, D. Sc., Prof., RAS Academician
V. G. Peshehonov, D. Sc., Prof., RAS Academician
V. I. Shevchenko, D. Sc.
E. V. Shlyakhto, D. Sc., Prof., RAS Academician

Editor V. A. Chernikova

Computer layout and design Yu. V. Umnitsyna

Submitted for publication 26.02.2024. Signed for printing: 29.02.2024. Format 60 × 84 1/8.

Printed at the Editorial and Publishing Center, SUAI,
67, lit. A, Bolshaya Morskaya str., Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Free distribution

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1

ISSN 2949-0693

Инновационное приборостроение

Основан в 2022 г.

Учредитель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

Издатель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

Главный редактор

Е. А. Фролова,
доктор технических наук, доцент,
директор института фундаментальной
подготовки и технологических инноваций,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

Заместитель главного редактора

С. А. Назаревич,
кандидат технических наук, доцент

Ответственный секретарь

В. А. Тушавин,
доктор технических наук

Редакционная коллегия

А. Р. Бестугин, д-р техн. наук, проф.
А. С. Будагов, д-р экон. наук, доц.
Н. А. Жильникова, д-р техн. наук, доц.
М. Л. Кричевский, д-р техн. наук, проф.
Н. Н. Майоров, д-р техн. наук, доц.
А. В. Небылов, д-р техн. наук, проф.
А. О. Смирнов, д-р физ.-мат. наук, доц.
Т. М. Татарникова, д-р техн. наук, проф.
В. А. Тушавин, д-р техн. наук
В. Г. Фарафонов, д-р физ.-мат. наук, проф.
Е. А. Фролова, д-р техн. наук, доц.
В. Ф. Шишлаков, д-р техн. наук, проф.

Научный журнал

Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций 24 июня 2022 г.
(Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-83496
от 24.06.2022 – печатное издание)

Периодичность издания: 6 номеров в год

Страницы журнала открыты для дискуссионных
материалов; его содержание не обязательно
отражает точку зрения учредителя и редакции.

Перепечатка публикаций из журнала «Инновационное
приборостроение» в зарубежные издания допускается
по согласованию с редакцией.

Ссылка на журнал «Инновационное приборостроение»
обязательна.

Адрес редакции и издателя

Редакционно-издательский центр
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»,
190000, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
Тел.: (812) 494-70-69
E-mail: ip@guap.ru
Сайт: <https://guap.ru/inps>

Редакционный совет

Ю. А. Антохина, д-р экон. наук, проф.
А. В. Демидов, д-р техн. наук, проф.
В. В. Иванов, д-р экон. наук, чл.-корр. РАН
Г. А. Коржавин, д-р техн. наук, проф.
А. А. Оводенко, д-р техн. наук, проф.
В. В. Окрепилов, д-р экон. наук, проф., акад. РАН
В. Г. Пешехонов, д-р техн. наук, проф., акад. РАН
В. И. Шевченко, д-р физ.-мат. наук
Е. В. Шляхто, д-р мед. наук, проф., акад. РАН

Редактор *В. А. Черникова*
Компьютерная верстка и дизайн *Ю. В. Умницыной*

Подписано к печати 26.02.2024. Дата выхода в свет: 29.02.2024. Формат 60 × 84 1/8.
Уч.-изд. л. 11,8. Усл. печ. л. 11,2. Тираж 1000 экз. (1-й завод – 100 экз.). Заказ № 33.

Отпечатано в редакционно-издательском центре ГУАП
190000, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Распространяется бесплатно

О ЖУРНАЛЕ

Научный журнал «Инновационное приборостроение» – периодическое научное СМИ, которое издается с 2022 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП) с целью консолидации и развития научных знаний и практических наработок в основных сферах его научной деятельности. В журнале «Инновационное приборостроение» публикуются научные обзоры, статьи проблемного и научно-практического характера по следующим направлениям: приборостроение, метрология, стандартизация и управление качеством; радиотехника, инфокоммуникационные технологии и системы связи; кибберфизические системы и цифровая трансформация; фундаментальные науки и прикладные исследования; цифровая экономика и управление организацией.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство ПИ № ФС 77-83496 от 24.06.2022.

АКАДЕМИКУ ВЛАДИМИРУ ВАЛЕНТИНОВИЧУ ОКРЕПИЛОВУ – 80 ЛЕТ! ACADEMICIAN VLADIMIR VALENTINOVICH OKREPILOV – 80 YEARS OLD!

В феврале 2024 г. исполняется 80 лет доктору экономических наук, профессору, академику РАН, научному руководителю Института проблем региональной экономики РАН, почетному гражданину Санкт-Петербурга Владимиру Валентиновичу Окрепилову.

Глубокоуважаемый Владимир Валентинович!

Вы известны в России и мире как основатель нового научного направления – экономики качества, высококлассный специалист в области разработки теоретических основ экономики качества и ее роли в социально-экономическом развитии и повышении качества жизни, методики управления качеством в различных сферах деятельности.

Вы активно участвовали в разработке «Стратегии экономического и социального развития Санкт-Петербурга до 2030 г.» и ее продолжения – «Стратегии социально-экономического развития Санкт-Петербурга на период до 2035 г.», «Комплексной научно-технической программы Северо-Западного федерального округа Российской Федерации до 2030 г.», других важнейших программ научного, экономического, технологического и социального развития регионов России.

Под Вашим руководством создана единственная в России научная школа по экономике качества, неоднократно занимавшая первые места в реестре ведущих научных школ Санкт-Петербурга и России. Ее разработки широко применяются для решения актуальных проблем социально-экономического развития не только в российских организациях, но и в деятельности Европейской организации качества (ЕОК), Европейского фонда управления качеством (ЕФОМ), Международной сети сертификации систем менеджмента (IQNET).

Вы внесли решающий вклад в создание в Санкт-Петербурге уникальной многоуровневой системы непрерывного обучения кадров по экономике качества. Как мудрый и прозорливый руководитель, Вы прекрасно понимаете важность передачи своего бесценного опыта, много сил отдаете подготовке, обучению молодых специалистов, среди Ваших учеников много докторов и кандидатов наук. Вы – член Бюро Отделения общественных наук РАН, член Президиума Санкт-Петербургского отделения РАН, председатель Научного совета «Региональные проблемы экономики качества» Отделения общественных наук РАН, заместитель председателя Научного совета РАН по метро-



логическому обеспечению и стандартизации, руководитель Северо-Западной секции содействия развитию экономической науки Отделения общественных наук РАН, ректор частного образовательного учреждения дополнительного профессионального образования «Институт управления качеством», заведующий кафедрой Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, заведующий кафедрой ЮНЕСКО Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, заведующий базовой кафедрой Санкт-Петербургского государственного экономического университета. Являетесь автором более 830 научных работ, принимаете участие в работе редколлегий ведущих научных журналов.

Ваши достижения получили общественное признание, отмечены высокими правительственными наградами и почетными званиями. Среди них – орден Дружбы народов, орден «За заслуги перед Отечеством» IV степени, орден Почета, орден Дружбы, Почетная грамота Президента Российской Федерации, Благодарность Председателя Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации.

Вы являетесь лауреатом Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники, премии Президента Российской Федерации в области образования, премии Правительства Российской Федерации в области образования, премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, премии Правительства Санкт-Петербурга в области образования, премии Правительства Санкт-Петербурга и Санкт-Петербургского научного центра РАН за выдающиеся научные результаты в области общественных наук им. В. В. Новожилова, премии Российской академии наук за лучшие работы по популяризации науки.

Вы удостоены званий заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, почетного работника науки и техники Российской Федерации, почетного

метролога, почетной грамоты Министерства промышленности и энергетики Российской Федерации, почетного знака «За заслуги перед Санкт-Петербургом», знака отличия «За заслуги перед Санкт-Петербургом», знака отличия Ленинградской области «За вклад в развитие Ленинградской области», почетной грамоты Губернатора Санкт-Петербурга, почетных грамот Губернатора Ленинградской области, почетного диплома Законодательного собрания Ленинградской области.

Избрание Вас в 2016 г. почетным гражданином Санкт-Петербурга свидетельствует о Вашем огромном вкладе в развитие нашего города.

Мы знаем Вас как энергичного, творческого ученого, внимательного коллегу, человека, открытого новому, готового отдавать все силы служению науке, поиску новых подходов, искренне заинтересованного в процветании Отечества.

Желаем Вам, Владимир Валентинович, крепкого здоровья, вдохновения, новых интересных проектов и открытий! Пусть Вам и Вашим близким во всем сопутствуют успех, счастье и благополучие!

Юлия Анатольевна Антохина
доктор экономических наук, профессор,
ректор ГУАП

Научная статья
УДК 658.7

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-7-11

Обеспечение качества закупки электронной компонентной базы на основе статических, динамических моделей и нейронных сетей

Геннадий Иванович Коршунов¹

✉ kgj@pantes.ru, SPIN-код: 1961-4874

Егор Дмитриевич Макаров¹

travellerw3@gmail.com, SPIN-код: 4431-6842

Кирилл Алексеевич Борисенко¹

borisenko201463@yandex.ru, SPIN-код: 3452-9625

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрена проблема обеспечения качества электронного изделия на этапе выбора поставщика электронной компонентной базы. Обусловлена необходимость обеспечения качества закупок. Приведены статические модели выбора поставщиков на основе локальных и обобщенных критериев и динамические модели выбора поставщиков на основе нейронных сетей.

Ключевые слова: показатели, критерии, технология, электронная компонентная база, качество

Для цитирования: Коршунов Г. И., Макаров Е. Д., Борисенко К. А. Обеспечение качества закупки электронной компонентной базы на основе статических, динамических моделей и нейронных сетей // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 1. С. 7–11. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-7-11.

Original article

Ensuring the quality of procurement of electronic component base based on static, dynamic models and neural networks

Gennady I. Korshunov¹

✉ kgj@pantes.ru, SPIN-code: 1961-4874

Egor D. Makarov¹

travellerw3@gmail.com, SPIN-code: 4431-6842

Kirill A. Borisenko¹

borisenko201463@yandex.ru, SPIN-code: 3452-9625

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article discusses the problem of ensuring the quality of an electronic product at the stage of selecting a supplier of electronic component base. There is a need to ensure the quality of procurement. Static models of supplier selection based on local and generalized criteria and dynamic models of supplier selection based on neural networks are presented.

Keywords: indicators, criteria, technology, electronic component base, quality

For citation: Korshunov G. I., Makarov E. D., Borisenko K. A. Ensuring the quality of procurement of electronic component base based on static, dynamic models and neural networks. *Innovacionnoe priboroostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(1):7–11. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-7-11.

Введение

Инновации в производственных процессах развиваются в направлении автоматизации и снижения влияния внешних факторов на производство. Активная разработка и интеграция нововведений позволяют предприятию обеспечивать высокие параметры качества продукции,

таким образом создавая преимущество в рамках конкурентной борьбы на рынке.

Для обеспечения качества продукции предприятию требуется непрерывно вести комплексную работу в направлении улучшения источников поставки комплектации. Особенно актуальным данный процесс становится для предприятий электронной промышленности, так как в данном случае комплектация продукции

представляет собой электронную компонентную базу.

В условиях непрерывно оказываемого санкционного давления на российский рынок электронных компонентов, а также активного развития стратегии импортозамещения динамически изменяется список доступных поставщиков, каждый из которых обладает своими уникальными параметрами и условиями работы (цены, сроки поставки, условия работы, выбор канала для логистики, выбор источника поставки, проверка качества комплектации до отгрузки поставки в адрес заказчика).

Все эти параметры требуют проведения тщательного анализа перед принятием решения. Как следствие, решение данной задачи представляет собой комплексный процесс. Дополнительно данная задача может быть осложнена выполнением требования по диверсификации поставок – оно обусловлено целью снижения рисков срыва срока изготовления изделия или экономической целесообразностью. Применение моделей выбора и автоматизация процесса путем внедрения интеллектуальной системы поддержки принятия решений позволят ускорить решение задачи.

Целью данной работы является решение задачи обеспечения качества закупок на основе статических и динамических моделей выбора.

Модели выбора поставщиков

В исследовании приведены модели двух типов – статические для первичной оценки постав-

щиков и рекурсивные динамические, обеспечивающие учет предыстории поставщика и возможность прогнозирования.

Статические модели выбора поставщиков по локальным и обобщенному критериям

Для первой статической модели предлагается осуществлять выбор поставщиков, используя формулу свертки для расчета параметра Q_1 . Данные для расчета получены на основании четырех выбранных критериев q_1, \dots, q_4 , представляющих собой основные показатели поставщика. В табл. 1 приведен пример оценки поставщиков на основе данной модели.

Все показатели заполняются по 10-балльной шкале (где 1 – это «отлично», 10 – «очень плохо»). В строке 5 – произведение показателей: если один или несколько показателей равны нулю, то все произведение обращается в ноль. В строке 6 приведена расчетная сумма баллов, а в строке 7 – нормированная величина локального критерия.

Полученные в результате применения модели варианты могут быть выставлены в приоритетный ряд по критерию показателей качества поставщиков, слева – наибольший (наихудший вариант).

Вторая статическая модель построена на оценке критериев рисков, связанных с поставщиками. С использованием методологии FMEA, на основе четырех численных показателей, производится расчет сводного параметра критерия риска Q_2 . В табл. 2 приведен пример расчетов рисков с применением предлагаемой модели.

Все показатели заполняются по 10-балльной шкале (где 1 – это «отлично», 10 – «очень плохо»).

- Таблица 1. Выбор поставщиков по локальному критерию Q_1
- Table 1. Selection of suppliers based on local criterion Q_1

Строка	Показатель качества (локальный критерий)	Номер фирмы-поставщика электронной компонентной базы ($j = 1, \dots, 9$)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Стоимость q_1	3	6	10	8	0	3	4	8	2
2	Сроки q_2	8	8	7	10	1	5	0	10	4
3	Качество товара q_3	9	0	7	2	1	0	8	10	9
4	Надежность поставщика q_4	10	1	7	10	3	4	7	7	0
5	$\prod_{i=1}^{i=4} q_i$	2160	0	3430	1600	0	0	0	5600	0
6	$\sum_{i=1}^{i=4} q_i$	30	–	31	30	–	–	–	35	–
7	$Q_{1j} = \frac{\sum_{i=1}^{i=4} q_i}{\sum_{j=1}^9 \sum_{i=1}^{i=4} q_i}$	8	0	1	4	0	0	0	6	0

- Таблица 2. Выбор поставщиков по локальному критерию Q_2
- Table 2. Selection of suppliers based on local criterion Q_2

Строка	Показатель рисков	Номер фирмы-поставщика электронной компонентной базы ($j = 1, \dots, 9$)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Тяжесть последствия	8	8	9	9	6	8	9	9	7
2	Вероятность	2	8	3	8	8	9	10	1	3
3	Обнаружение несоответствия	1	10	3	8	8	9	10	1	3
4	Приоритетное число риска	16	640	81	576	384	648	900	9	63
5	Приоритетное число риска (≤ 125), R_j	16	–	81	–	–	–	–	9	63
6	$Q_{2j} = R_j / \sum_{j=1}^9 R_j$	0,095	–	0,479	–	–	–	–	0,053	0,372

В строке 4 – приоритетное число риска (ПЧР), являющееся произведением базовых показателей. В строке 5 представлены ПЧР для поставщиков, полученный показатель ПЧР которых меньше либо равен 125. В строке 6 представлены итоговые результаты расчета показателя Q_2 .

Как и для первой модели, полученные в результате расчета варианты поставщиков могут быть выставлены в приоритетный ряд по критерию оценки риска, слева – наибольший (наихудший вариант).

Третья статическая модель предлагает осуществить выбор поставщиков по обобщенному критерию Q_3 мультипликативного вида. Мультипликативная форма в виде перемножения значений локальных критериев для каждого поставщика выбрана исходя из свойства умножения на ноль и высокой чувствительности к результату.

Варианты могут быть выставлены в приоритетный ряд по обобщенному критерию, слева – наибольший (наихудший вариант).

Динамические модели выбора поставщиков

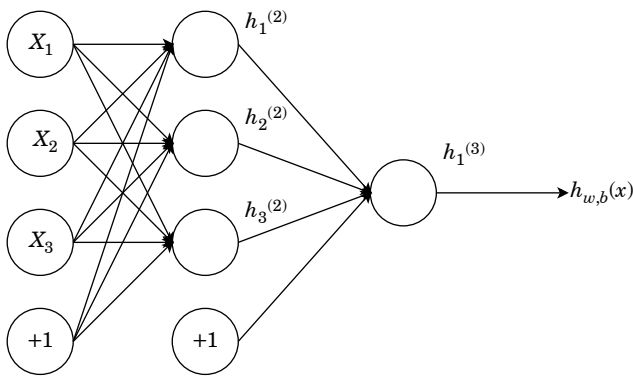
Наиболее перспективным направлением для создания моделей оценки является применение

нейронных сетей (НС). Здесь не выполняется сравнительный анализ НС, представленный, например, в [1]. Свойства НС обеспечивают решение задач выбора поставщиков в условиях динамически меняющихся показателей качества, оценок рисков, а также способны хранить предысторию и прогнозировать состояние поставщиков. В трехслойных НС на входы подается необходимая информация (например, о закупках), в скрытом слое могут содержаться управляемые данные об обработке и исполнении (функции поставщика), на выходе формируется решение (выбор поставщика).

Существует два основных вида НС – прямого распространения и рекурсивные. На рис. 1 можно увидеть три слоя НС прямого распространения [1]. Слой 1 является входным слоем, где сеть принимает внешние входные данные. Слой 2 называют скрытым слоем, этот слой не является частью ни входа, ни выхода. Стоит отметить, что нейронные сети могут иметь несколько скрытых слоев, в рассматриваемом случае для примера был показан лишь один. И, наконец, слой 3 является исходным слоем. Можно заметить, что между шаром 1 (Ш1) и шаром 2 (Ш2) существует много связей. Каждый узел в Ш1 имеет связь со всеми узлами в Ш2, при этом от каждого узла

- Таблица 3. Выбор поставщиков по обобщенному критерию Q_3
- Table 3. Selection of suppliers based on local criterion Q_3

Строка	Локальный и обобщенный критерии	Номер фирмы-поставщика электронной компонентной базы ($j = 1, \dots, 9$)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Q_{1j}	3	6	10	8	0	3	4	8	2
2	Q_{2j}	8	8	7	10	1	5	0	10	4
3	$Q_{3j} = Q_{1j} \cdot Q_{2j}$	9	0	7	2	1	0	8	10	9



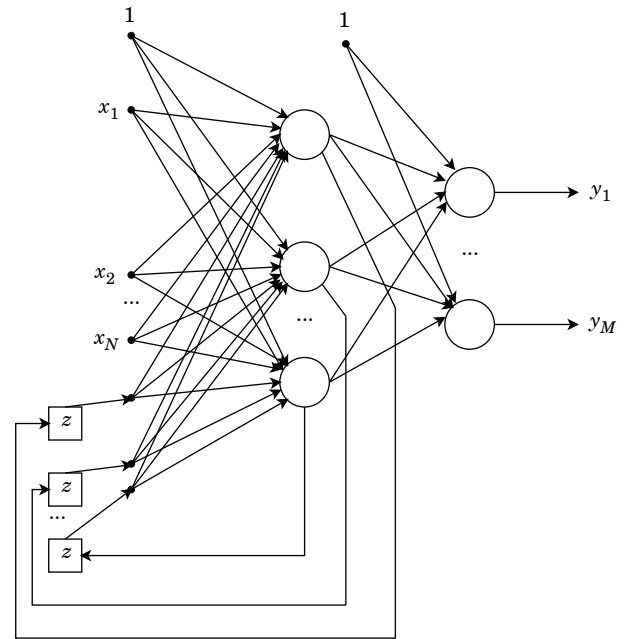
• *Рис. 1. Три слоя НС прямого распространения*
 • *Fig. 1. Three layers of direct propagation neural network*

в Ш2 идет по одной связи к единому выходному узлу в Ш3. Каждая из этих связей должна иметь соответствующий вес.

Рекурсивная НС Эльмана [2] нашла широкое применение для решения разного рода технических, производственных и связанных с ними задач обеспечения, к которым относится и процесс закупок. Рекурсивная сеть Эльмана характеризуется обратной связью между скрытым и входным слоем, реализуемой с помощью единичных элементов запаздывания z . Обобщенная структура этой сети показана на рис. 2.

Каждый скрытый нейрон имеет свой аналог в контекстном слое, образующем совместно с внешними входами сети входной слой. Выходной слой состоит из нейронов, однонаправленно связанных только с нейронами скрытого слоя. Внутренний вектор возбуждения сети обозначим x (в его состав входит также единичный сигнал поляризации), скрытые t нейронов расположены в среднем слое и соединены обратными связями через элементы задержки, выходные сигналы сети – y .

Необходимые входные данные вводятся, и коэффициенты значимости впоследствии корректируются через обратные связи или рассчитываются на основе статистических данных, приведенных выше.



• *Рис. 2. Обобщенная структура рекурсивной НС Эльмана*
 • *Fig. 2. Generalized structure of the recursive Elman neural network*

Заключение

В статье представлены статические и динамические модели выбора поставщиков, позволяющие существенно сократить время, необходимое для принятия решения о выборе наиболее подходящего поставщика. Помимо этого, становится возможным прогнозирование качества поставок – это позволит своевременно спланировать дальнейшие производственные процессы.

Стоит отметить, что для применения данных моделей требуется сформировать статистическую выборку на основе ранее собранных данных о поставщиках, а также следует учесть, что для успешной интеграции нейронных сетей в структуру предприятия для последнего требуется наличие свободных информационно-технических ресурсов, с возможностью их динамического расширения для повышения эффективности работы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пишем свою нейросеть: пошаговое руководство // proglib.io. URL: <https://proglib.io/p/neural-nets-guide> (дата обращения: 17.12.2023)
2. Хужаев О. К., Ядгаров Ш. А., Пак В. С. Сравнение моделей нейронной сети для прогнозирования временных рядов // Техн. науки – от теории к практике. 2014. № 35. С. 22–30.

REFERENCES

1. Writing your own neural network: a step-by-step guide. proglib.io. Available from: <https://proglib.io/p/neural-nets-guide> [Accessed 17 December 2023].
2. Khujaev O. K., Yadgarov Sh. A., Pak V. S. Comparison of neural networks models for time series prediction. Technical sciences – from theory to practice. 2014;(35):22–30. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Коршунов Геннадий Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – организация производства, управление качеством, киберфизические системы.

Макаров Егор Дмитриевич, аспирант кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление качеством в сложных системах и системах управления.

Борисенко Кирилл Алексеевич, студент Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление качеством в сложных системах и системах управления.

Korshunov Gennady I., D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – organization of production, quality management, cyberphysical systems.

Makarov Egor D., Postgraduate Student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – quality management in complex systems and control systems.

Borisenko Kirill A., Student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – quality management in complex systems and control systems.

Поступила в редакцию 18.12.2023

Поступила после рецензирования 23.12.2023

Принята к публикации 29.01.2024

Received 18.12.2023

Revised 23.12.2023

Accepted 29.01.2024

Научная статья
УДК 658.7

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-12-16

Организация прослеживаемости электронной продукции на этапах жизненного цикла на основе базовой цифровой модели

Геннадий Иванович Коршунов¹

✉ kgj@pantes.ru, SPIN-код: 1961-4874

Егор Дмитриевич Макаров¹

travellerw3@gmail.com, SPIN-код: 4431-6842

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрена проблема организации производственных процессов и обеспечения качества продукции с точки зрения актуализации, внедрения и архивирования всей конструкторской документации по изделиям. Обоснована необходимость систематизации и агрегации данных, которые при проведении повторных заказов, возникновении спорных ситуаций или несоответствий смогут стать ключевыми объектами при поиске способов решения. Представлено решение на основе базовой цифровой модели с элементами рекурсии.

Ключевые слова: качество, цифровая модель, прослеживаемость, документация

Для цитирования: Коршунов Г. И., Макаров Е. Д. Организация прослеживаемости электронной продукции на этапах жизненного цикла на основе базовой цифровой модели // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 1. С. 12–16. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-12-16.

Original article

Organization of traceability of electronic products at life cycle stages based on a basic digital model

Gennady I. Korshunov¹

✉ kgj@pantes.ru, SPIN-code: 1961-4874

Egor D. Makarov¹

travellerw3@gmail.com, SPIN-code: 4431-6842

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article examines the problem of organizing production processes and ensuring product quality from the point of view of updating, implementing, and archiving all design documentation for products. There is a need for systematization and aggregation of data, which, when carrying out repeat orders, the occurrence of controversial situations or inconsistencies, can become key objects in the search for solutions. A solution is presented based on a basic digital model with recursion elements.

Keywords: quality, digital model, traceability, documentation

For citation: Korshunov G. I., Makarov E. D. Organization of traceability of electronic products at life cycle stages based on a basic digital model. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(1):12–16. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-12-16.

Введение

Наиболее удобным и современным методом ведения документации является применение системы электронного документооборота в рамках единой цифровой системы предприятия.

Для решения задачи сокращения времени, затрачиваемого на проведение опытно-конструкторских работ, была разработана система CALS – система управления жизненным циклом изделия, позволяющая при ее применении авто-

матизировать все этапы производства изделия, начиная с этапа разработки и заканчивая этапом постпродажного обслуживания.

Интеграция системы CALS предполагает внедрение электронного документооборота для сопровождения изделия. Постоянная актуализация информации в рамках модульности данной системы позволяет в кратчайшие сроки учитывать все изменения, динамически обновляя информацию об изделии. Своевременное отслеживание всех выявленных ошибок и несоответствий

позволяет сократить количество затрачиваемого времени на актуализацию сопроводительной документации изделия.

В рамках производства и разработки изделия электронной промышленности внедрение электронного документооборота особенно актуально. Производство качественного продукта в данной отрасли требует неукоснительного следования международным стандартам качества. Однако задача обеспечения требуемых параметров качества усложняется при применении новых материалов или использовании материалов, полученных из новых источников поставки, особенно в тех случаях, когда полученные вместе с материалами справочные данные не в полной мере соответствуют или вовсе не соответствуют реальным условиям. Помимо этого, активное развитие стратегии импортозамещения обеспечивает расширение доступной к применению компонентной базы, однако немногочисленность изделий, в основу которых заложена отечественная продукция, не позволяет сформировать информационную базу, позволяющую полноценно оценить качество производимого продукта.

Жизненный цикл электронного изделия включает в себя этапы, по-разному обеспеченные для включения в цифровую модель. Данные этапы приведены в таблице. При прохождении каждого из этих этапов проводится процедура проверки соответствия документации единым нормам и требованиям. Внедрение электронного документооборота позволяет автоматизировать данный процесс для разных случаев разными методами.

Целью настоящей работы является обеспечение качества и прослеживаемости электронной продукции на этапах жизненного цикла на основе методики анализа функционально необходимых моделей (структур) и трудноформализуемых процессов, их преобразования в функционально

достаточные модели (структуры) для включения в базовую цифровую модель (структуру), представляющую сквозной жизненный цикл.

Модель и методика

Рассмотрим требования к базовой цифровой модели изделия (БЦМ). Идея построения базовых моделей не является оригинальной. В рассматриваемом случае предложено БЦМ рассматривать как результат цифрового моделирования жизненного цикла электронной продукции. Реализация модели достигается созданием аппаратно-программных базовых структур. Выбор базовой модели и структуры должен обеспечивать выполнение принятого уровня требований и возможность наращивания функциональных возможностей, в том числе интеллектуальных.

Последовательность включения дополняющих функций определяется инновационным развитием в данной проблемной области и финансовыми возможностями организации с различными типами организационных структур. Эти вопросы рассмотрены в [1–3]. Базовыми структурами названы функционально-необходимые (ФНС) и функционально-достаточные (ФДС) структуры. Предложенные ФНС и ФДС, в приложении к производству электроники, представлены стандартом IPC-SMEMA-9851 [4] и развиваемой версией IPC-HERMES-9852 [5]. Развитие версий достигается обоснованием и выбором новых элементов на основе статистического анализа производимой продукции и локализации причин, вызванных как недостаточными возможностями оборудования, так и различными внешними факторами (например, ошибками сотрудников). В терминах технологии поверхностного монтажа печатных плат конфигурация оборудования IPC-SMEMA-9851 представляет собой ФНС.

- *Этапы жизненного цикла изделия*
- *Product life cycle stages*

Номер	Этап	Средство формализованного представления конструкторской документации	Возможность включения в цифровую модель
1	Техническое задание	Трудноформализуемо	Частично
2	Технический проект	CAD, CAM	Возможно
3	Рабочий проект	CAD, CAM	Возможно
4	Изготовление опытного образца	Трудноформализуемо	Частично
5	Предварительные испытания	Трудноформализуемо	Частично
6	Приемочные испытания	Трудноформализуемо	Частично
7	Технологическая подготовка производства	Трудноформализуемо	Частично

Дальнейшее развитие может быть представлено созданием ФДС. ФДС характеризуются наличием некоторой избыточности, допустимой в рамках заданных ограничений. Этому определению соответствует технология IPC-HERMES-9852.

Базовая цифровая модель имеет в основе иерархичную структуру, помимо этого, данная структура позволяет также организовать ветвление, что дает возможность создавать и динамически отслеживать изменения для нескольких версий изделия. Следовательно, для каждой из ветвей должна параллельно корректироваться проектная и техническая документация. Частично автоматизировать данный процесс позволяют САД-системы и САМ-системы – в них присутствует функциональная возможность вывода вспомогательной документации: например, эскизов печатной платы, списка материалов, электрической схемы. Помимо этого, требуется также актуализировать и накапливать всю сопроводительную документацию к выбранной для производства изделия электронной компонентной базе (ЭКБ) – это необходимо для агрегации данных о характеристиках, условиях эксплуатации, режимах пайки, хранении. Таким образом, базовая цифровая модель представляет собой на выходе объект с большим количеством зависимостей, представляющих собой документ или ссылку на составляющую документа.

На данном этапе дополнения БЦМ необходимым действием является интеграция модели с системой Traceability. Это позволит на всех дальнейших этапах производства автоматически выявлять ошибки и формировать отчеты о данных ошибках, включающих в себя информацию о составляющей, на которой была получена данная ошибка (первичная составляющая), а также информацию от всех составляющих, имеющих привязку к прецедентной составляющей (вторичная составляющая). Помимо этого, система Traceability позволит отслеживать историю изменений для каждой составляющей изделия.

Полученная базовая цифровая модель изделия далее может быть передана в сектор технологической подготовки производства. На основе данной модели сектор формирует список своих требований и изменений, необходимых для обеспечения качества производимого продукта, обусловленных требованиями технологичности процесса производства и международными стандартами качества, такими как IPC-9261A [6], IPC-7912A [7] и J-STD-001 [8]. В рамках работы с БЦМ сектор может указать, в какие составляющие требуется внести корректировки, используя функцию сквозного обращения к составляющей или фрагменту составляющей БЦМ для обосно-

вания необходимости корректирования. После изменения составляющих БЦМ смежным сектором сектор технологической подготовки разрабатывает и вносит новые составляющие, например:

- маршрутные карты;
- технологические карты;
- программы работы автоматизированных систем производства и пайки компонентов;
- программы работы автоматизированных систем технического контроля;
- список материалов и составляющих, необходимых для технологического обеспечения производства.

Далее БЦМ переходит в распоряжение сектора технического контроля качества. Применяя данную модель, сектор может сформировать и добавить новые составляющие, такие как:

- отчеты о выявленных отклонениях;
- несоответствия;
- сопроводительные документы.

Каждая из данных составляющих имеет сквозную связь с другими составляющими БЦМ, внесенными ранее. Это позволяет оперативно на всех предыдущих этапах расширения модели провести работы по изучению, корректировке или обновлению версий составляющей или составляющих, при этом данные корректировки должны также иметь сквозную связь с составляющими модели, добавленными сектором технологической подготовки производства.

Наконец, БЦМ переходит в распоряжение сектора функционального контроля. Работа данного сектора строится на основе составляющих, внесенных в секторе конструирования, т. е. на основе методик функционального контроля и тестирования изделия на предмет выполнения требований технического задания. Основными составляющими, вносимыми сектором функционального контроля, являются акты об успешном прохождении тестирования или о провале тестирования. Провал функционального тестирования может иметь следующие причины:

- 1) несовершенство методик функционального тестирования;
- 2) несовершенство или функциональное несоответствие разработанного окружения для функционального контроля изделия;
- 3) несовершенство или функциональное несоответствие ЭКБ, применяемой в данном изделии;
- 4) несовершенство или несоответствие материалов и технологий, выбранных для производства;
- 5) несовершенство методик проверки качества изготовления.

Формируемые акты должны иметь сквозную связь со всеми составляющими, имеющими от-

ношение к узлу или компоненту, в результате применения которого тестирование изделия не было успешно завершено. Это позволит вести параллельную работу по поиску всех возможных отклонений на всех предыдущих этапах взаимодействия с БЦМ для оперативного выявления отклонений в связанных составляющих.

В результате прохождения всего жизненного цикла БЦМ будет обладать наиболее объемным набором составляющих, на основе которых станет возможным автоматически сформировать и подготовить окончательный вариант конструкторской документации (КД) на изделие, оформленный в соответствии с требованиями ЕСКД и ЕСТД и пригодный для дальнейшего использования при серийном производстве изделия.

БЦМ после формирования КД будет сохранена в едином цифровом архиве предприятия для

возможности обращения в любой момент времени в случае появления производственной необходимости.

Заключение

Предложенная методика анализа функционально-необходимых моделей (структур) и трудноформализуемых процессов, их преобразования в функционально-достаточные модели (структуры) позволяет включить их в базовую цифровую модель (структуру), представляющую сквозной жизненный цикл. Достигается это за счет сквозной иерархической связки всех документов, задействованных при разработке изделия, что обеспечивает необходимое качество и прослеживаемость электронной продукции на этапах жизненного цикла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коршунов Г. И. Обеспечение качества сложных систем: монография / СПбГУВК. СПб., 2001.
2. Korshunov G. I. Two approaches for modelling of digital technological innovation in achieving defect-free electronics production // Journal of physics: Conference series. 2022. Vol. 2373. P. 062012. Doi: 10.1088/1742-6596/2373/6/062012.
3. Коршунов Г. И., Поляков С. Л., Романец В. И. Обеспечение качества радиоэлектронной продукции на предприятиях с различными типами организационных структур // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 74–80. Doi: 10.21685/2307-4205-2021-4-9.
4. IPC-SMEMA-9851. Mechanical equipment interface standard / eds by Assembly equipment mechanical interface subcommittee (5-42) of IPC. Bannockburn, IL: IPC, 2007.
5. IPC-HERMES-9852. Version 1.2. The Global standard for machine-to-machine communication in SMT assembly / eds by the Hermes standard initiative and approved by IPC. Bannockburn, IL: IPC, 2019.
6. IPC-9261A. In-process DPMO and estimated yield for PCAs / eds by DPMO and assemblies, attributes and variables identification task group (5-22g) of the assembly and joining processes committee (5-20) of IPC. Bannockburn, IL: IPC, 2006.
7. IPC-7912A. End-item DPMO for printed circuit board assemblies / eds by DPMO and assemblies, attributes and variables identification task group (5-22g) of the Assembly and joining processes committee (5-20) of IPC. Bannockburn, IL: IPC, 2004.
8. Requirements for soldered electrical and electronic assemblies / eds by the J-STD-001 Task Group (5-22a) of the Soldering Subcommittee (5-22) of the Assembly & Joining Committee (5-20) of IPC. Bannockburn, IL: IPC, 2017.

REFERENCES

1. Korshunov G. I. Quality assurance of complex systems: monography. SPb.; 2001. (In Russ.).
2. Korshunov G. I. Two approaches for modelling of digital technological innovation in achieving defect-free electronics production. Journal of physics: Conference series. 2022;2373:062012. Doi: 10.1088/1742-6596/2373/6/062012.
3. Korshunov G. I., Polyakov S. L., Romanets V. I. Ensuring the quality of radio-electronic products at enterprises with various types of organizational structures. Reliability and quality of complex systems. 2021;(4):74–80. (In Russ.).
4. IPC-SMEMA-9851. Mechanical equipment interface standard; eds by Assembly equipment mechanical interface subcommittee (5-42) of IPC. Bannockburn, IL: IPC; 2007.
5. IPC-HERMES-9852. Version 1.2. The Global standard for machine-to-machine communication in SMT assembly; eds by the Hermes standard initiative and approved by IPC. Bannockburn, IL: IPC; 2019.
6. IPC-9261A. In-process DPMO and estimated yield for PCAs; eds by DPMO and assemblies, attributes and variables identification task group (5-22g) of the assembly and joining processes committee (5-20) of IPC. Bannockburn, IL: IPC; 2006.

7. IPC-7912A. End-item DPMO for printed circuit board assemblies; eds by DPMO and assemblies, attributes and variables identification task group (5-22g) of the Assembly and joining processes committee (5-20) of IPC. Bannockburn, IL: IPC; 2004.
8. Requirements for soldered electrical and electronic assemblies; eds by the J-STD-001 Task Group (5-22a) of the Soldering Subcommittee (5-22) of the Assembly & Joining Committee (5-20) of IPC. Bannockburn, IL: IPC; 2017.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Коршунов Геннадий Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – организация производства, управление качеством, киберфизические системы.

Макаров Егор Дмитриевич, аспирант кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление качеством в сложных системах и системах управления.

Поступила в редакцию 20.12.2023

Поступила после рецензирования 23.12.2023

Принята к публикации 29.01.2024

Korshunov Gennady I., D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – organization of production, quality management, cyberphysical systems.

Makarov Egor D., Postgraduate Student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – quality management in complex systems and control systems.

Received 20.12.2023

Revised 23.12.2023

Accepted 29.01.2024

Измерение параметров цвета элементов оптической системы экспериментальной колориметрической установкой

Евгений Евгеньевич Майоров¹

✉ majorov_ee@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7634-1771, SPIN-код: 8599-8975

Вера Павловна Пушкина¹

vera150465@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-1617-3937, SPIN-код: 8621-3620

Рамиз Балахан оглы Гулиев¹

ramiz63@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-2812-1774, SPIN-код: 4263-7494

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Работа затрагивает вопросы измерения параметров цвета элементов оптической системы экспериментальной колориметрической установкой. В научной практике колориметрические приборы и комплексы востребованы и дают возможность получить высокоточную и достоверную информацию о контролируемом объекте, поэтому работа актуальна и перспективна. Представлены внешний вид, функциональная схема и технические параметры экспериментальной установки. Получены экспериментальные результаты координат цветности светофильтров из цветного стекла разных производителей на цветовом треугольнике, проведен сравнительный анализ экспериментальных данных.

Ключевые слова: колориметрическая установка, цветовой треугольник, светофильтр, координата цветности, цветовая система координат, фотодиод

Для цитирования: Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Гулиев Р. Б. Измерение параметров цвета элементов оптической системы экспериментальной колориметрической установкой // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 1. С. 17–21. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-17-21.

Original article

Measurement of the color parameters of the elements of the optical system by an experimental colorimetric installation

Evgeny E. Maiorov¹

✉ majorov_ee@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7634-1771, SPIN-code: 8599-8975

Vera P. Pushkina¹

vera150465@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-1617-3937, SPIN-code: 8621-3620

Ramiz B. Guliyev¹

ramiz63@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-2812-1774, SPIN-code: 4263-7494

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The work touches upon the issues of measuring the color parameters of the elements of the optical system with an experimental colorimetric installation. In scientific practice, colorimetric devices and complexes are in demand and make it possible to obtain high-precision, informative and reliable information about the controlled object, so the work is relevant and promising. The article presents the appearance, functional scheme and technical parameters of the experimental installation. Experimental results of chromaticity coordinates of colored glass filters from different manufacturers on a color triangle were obtained, a comparative analysis of experimental data was carried out.

Keywords: colorimetric installation, color triangle, light filter, chromaticity coordinate, color coordinate system, photodiode

For citation: Maiorov E. E., Pushkina V. P., Guliyev R. B. Measurement of the color parameters of the elements of the optical system by an experimental colorimetric installation. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(1):17–21. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-17-21.

Введение

Огромный интерес представляют фотометрические методы и технические средства диагностики и контроля для промышленности и на-

учно-технического прогресса. Фотометрическое направление – колориметрия – востребовано в наукоемких производствах, химии, пищевых технологиях и производствах, экологии, медицине, биологии [1, 2]. На сегодняшний день

колориметрические приборы и комплексы используются в различных производствах, обеспечивая непрерывный контроль технологического процесса по цветовым параметрам. Особую роль отводят лабораторным колориметрам, с помощью которых проверяются основные технические характеристики, а также исследуются метрологические возможности этих приборов [3, 4]. Например, исследуются разработанные приемные устройства с высокой чувствительностью в разных областях спектра, новейшие светофильтры для устранения ненужного сигнала и формирования необходимых спектров, применяются новые электронные системы сбора и обработки данных [5, 6].

Исследователи отмечают, что в лабораторных условиях колориметрия позволяет получить с высокой информативностью и малой погрешностью измерений результаты для различного агрегатного состояния изучаемого объекта или среды [7, 8]. Оригинальность этих методов состоит в том, что появляется возможность проводить измерения статистических процессов, не предъявляя особых требований к качеству поверхности изучаемого предмета, а также представлять трехмерное изображение экспериментальных данных в необходимой колориметрической системе [9, 10].

Колориметрические комплексы и приборы измерений цветности веществ различного агрегатного состояния основаны на измерении оптических спектров и расчете по этим спектральным данным координат цвета изучаемого объекта или среды в соответствующей цветовой системе координат (XYZ, CIE Lab, CIE Luw, CIE LCh, RGB и т. д.) [11, 12]. Интернет-ресурсы и научная литература в основном приводят технические характеристики, описания, принцип действия этих комплексов и приборов, однако отмечается тот факт, что больше в измерениях стали использоваться колориметры, где в качестве источников и приемников излучения применяют RGB-диоды. Видимо, это связано с новыми технологиями изготовления RGB-фотоприемников и RGB-светодиодных излучателей, которые не уступают по своим параметрам зарубежным аналогам.

Поэтому представляет интерес исследование светофильтров на основе цветного стекла лабораторной колориметрической установкой, где источник излучения – RGB-светодиод, а приемник излучения – RGB-фотодиод.

Цель работы состояла в измерении параметров цвета элементов оптической системы экспериментальной колориметрической установкой.

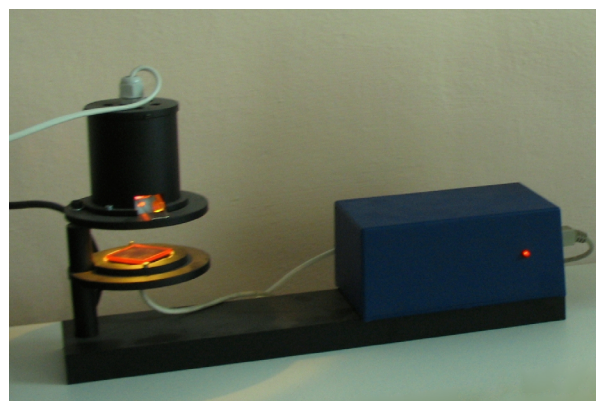
Постановка задачи

С помощью экспериментальной колориметрической установки определить цветовые параметры светофильтров из цветного стекла разных производителей. Провести сравнительный анализ, используя колориметрическую систему XYZ.

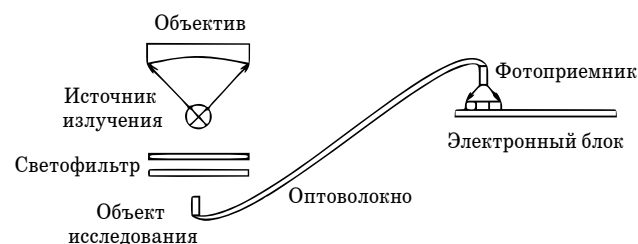
Материал и методы исследования

В качестве объекта исследования использовали светофильтры из цветного стекла, работающие в областях спектра 340–470, 480–570, 520–620 нм, разных производителей – Всероссийского научно-исследовательского института оптико-физических измерений (Россия), *Ocean Optics* (США), *FOCtek Photonics Inc.* (Китай).

Лабораторная колориметрическая установка применяется для измерения параметров цвета и яркости различных объектов в лабораторных условиях. Внешний вид установки показан на рис. 1. На рис. 2 приведена функциональная схема прибора. В качестве источника излучения использовали RGB-светодиодный излучатель. Прошедшее излучение через исследуемый светофильтр попадало на торец оптического волокна. Далее волоконно-оптическим каналом излучение



• Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки
• Fig. 1. Appearance of the experimental setup



• Рис. 2. Функциональная схема колориметра
• Fig. 2. Functional diagram of the colorimeter

- *Технические характеристики лабораторной колориметрической установки*
- *Technical specifications of laboratory colorimetric plant*

Источник света	RGB-светодиодный излучатель
Спектрофотометр	Анализатор собственной разработки: спектрофотометр лабораторный с голографической решеткой с высокой разрешающей способностью
Длина волн измерения	360...700 нм
Фотометрическая амплитуда	0...200 %
Напряжение	220 В
Условия окружающей среды	Температура – 5...40 °С, влажность – 5...85 %
Интерфейс	RS232; USB: 3.0
Шкала	Метрическая
Высота	450 мм
Ширина	250 мм
Глубина	470 мм
Вес	15 кг

доставлялось в приемную часть установки, где находился RGB-фотодиод.

С помощью электронной платы проводили измерение уровня сигналов в каждом из трех оптических каналов, оцифровку этих сигналов и их усреднение. Программа для анализа колориметрических данных позволяла представлять экспериментальные результаты в виде цифрового массива, а также в виде координат цветности в определенной колориметрической системе, сохранять в виде графического или текстового файла.

Технические характеристики лабораторной колориметрической установки приведены в таблице.

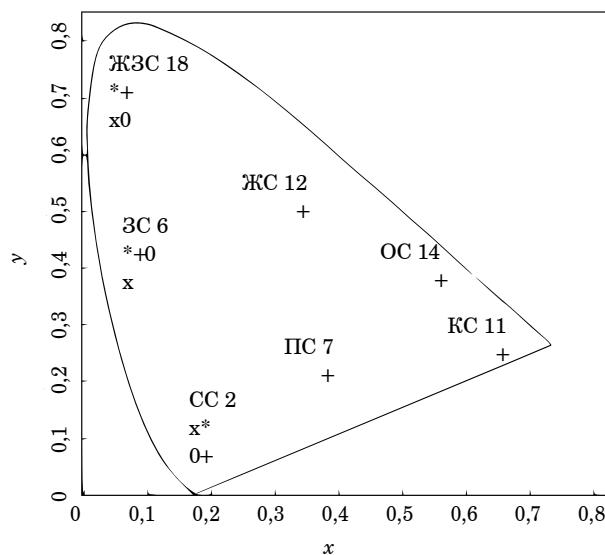
Результаты исследования

В комплект лабораторной колориметрической установки входит программное обеспечение, которое было создано для удобства представления экспериментальных результатов. Интерфейс программы достаточно удобен и прост. Данные о цветовых параметрах измеряемых объектах выводились на экран дисплея. Это были окружности красного (R), зеленого (G), синего (B) цветов. Соответственно, яркость была пропорциональна сигналам B, G, R фотоприемного устройства.

Наложение этих окружностей друг на друга образует цветовую область измеряемых образцов. В одном из полей интерфейса предоставляются значения сигналов с RGB-фотодиода. При измерениях учитывали составляющие выходного сигнала (пропускание и отражение элементами оптической системы), распределение энергии излучателя, цветовые параметры контролируемых образцов. Перед измерениями колориметр настраивали по эталону белого цвета. Параметры настройки сохраняли, нажав интерактивную кнопку в виде дискеты, принимая уровень сигнала за единицу в канале измерений. Измерения параметров абсорбционных светофильтров проводили при температуре 20 °С и влажности 48 %.

Параметры цветности (синий светофильтр (СС), зеленый светофильтр (ЗС), желто-зеленый светофильтр (ЖЗС)) представляли в графической форме, в виде строки, и приводили к значениям от 0 до 1 по образцу белого цвета.

Колориметром были измерены светофильтры на основе цветного стекла разных марок производителей и образцы каталогизированных цветных стекол. Каталогизированные цветные стекла применяли для сравнительного анализа с испытуемыми образцами и принимали за эталоны, представляющих собой параметры цветности x , y , z в системе XYZ. После чего определяли метрологическую погрешность.



• *Рис. 3. Экспериментальные результаты: СС, ЗС, ЖЗС; + – данные эталонов; * – светофильтры Всероссийского научно-исследовательского института оптико-физических измерений; x – светофильтры Ocean Optics; 0 – светофильтры FOCTek Photonics Inc.*

• *Fig. 3. Experimental results: blue light filter, green light filter, yellow-green light filter; + – reference data; * – light filters All-Russian Scientific Research Institute of Optical and Physical Measurements; x – light filters Ocean Optics; 0 – light filters FOCTek Photonics Inc.*

Полученные результаты приведены на рис. 3. Экспериментальные результаты координат цветности светофильтров показаны на цветовом треугольнике. На рис. 3 видно, что координаты цветности располагаются около вершин эталонов.

Полученные экспериментальные данные показывают, что все измеряемые абсорбционные светофильтры имеют маркеры вблизи цветовых координат эталонов. Это означает, что российские образцы не уступают зарубежным аналогам.

Заключение

Получены координаты цветности исследуемых светофильтров разных производителей. Проведено сравнение представленных образцов на цветовом треугольнике. Работа может представлять интерес для производителей светофильтров, а также спектральных приборов и комплексов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Юстова Е. Н. Цветовые измерения. Колориметрия. СПб.: СПбГУ, 2000. 397 с.
2. Каталог цветного стекла. М.: Машиностроение, 1967. 63 с.
3. Петровский Г. Т. Цветное оптическое стекло и особые стекла: каталог. М.: Дом оптики, 1990. 228 с.
4. Спектральное исследование текстильного оптического отбеливателя и органического красителя / Е. Е. Майоров [и др.] // Науч. приборостроение. 2021. Т. 31, № 1. С. 73–83.
5. Экспериментальное исследование разработанного колориметрического датчика для измерения цветности стекла / А. В. Арефьев [и др.] // Фундамент. и приклад. проблемы техники и технологии. 2021. № 1 (345). С. 131–137.
6. Применение спектроколориметрической системы для исследований реставрационных стоматологических материалов / Е. Е. Майоров [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 12. С. 6–10.
7. Измерение фотометрических параметров продукции целлюлозно-бумажной промышленности разработанным колориметрическим датчиком / Е. Е. Майоров [и др.] // Известия Тульского гос. ун-та. Техн. науки. 2021. Вып. 12. С. 275–279.
8. Экспериментальное исследование разработанной спектроколориметрической системы для изучения оптических свойств жидкофазных сред пищевой промышленности / Г. А. Цыганкова [др.] // Приборы. 2022. № 3 (261). С. 22–28.
9. Майоров Е. Е. Применение колориметрических систем для контроля качества бумажной продукции // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Третья Всерос. науч. конф. (СПб., 18–22 апр. 2022 г.): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2022. С. 56–58.
10. Майоров Е. Е. Измерение оптических параметров покрасочного слоя колориметрическим прибором // Известия высш. учеб. завед. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 413–419.
11. Исследование медицинских жидкофазных сред с использованием спектрофотометра с диапазоном длин волн 200...780 нм / Е. Е. Майоров [и др.] // Мед. техника. 2023. № 1. С. 53–55.
12. Исследование цветных диффузных отражателей с помощью лабораторной колориметрической установки / Е. Е. Майоров [и др.] // Приборы. 2023. № 7 (277). С. 30–35.

REFERENCES

1. Justova E. N. Color measurements. Colorimetry. SPb.: St. Petersburg State University; 2000. 397 p. (In Russ.).
2. Catalog of colored glass. Moscow: Mechanical engineering; 1967. 63 p. (In Russ.).
3. Petrovsky G. T. Colored optical glass and special glasses: catalog. Moscow: House of optics; 1990. 228 p. (In Russ.).
4. Maiorov E. E., Chernyak T. A., Tsygankova G. A., Mashek A. Ch., Konstantinova A. A., Pisareva E. A. Spectral study of textile optical bleach and organic dye. Scientific instrumentation. 2021;31(1):73–83. (In Russ.).
5. Arefyev A. V., Guliyev R. B., Dagaev A. V., Maiorov E. E., Pisareva E. A., Khokhlova M. V. Experimental study of the developed colorimetric sensor for measuring the chromaticity of glass. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2021;1(345):131–137. (In Russ.).
6. Maiorov E. E., Kurlov V. V., Dagaev A. V., Tayurskaya I. S., Gromov O. V., Guliyev R. B. Application of a spectrophotometric system for research of restorative dental materials. Devices and systems. Management, control, diagnostics. 2021;(12):6–10. (In Russ.).
7. Maiorov E. E., Kolesnichenko S. V., Tsygankova G. A., Pisareva E. A., Mashek A. Ch., Konstantinova A. A. Measurement of photometric parameters of pulp and paper industry products by the developed colorimetric sensor. Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2021;(12):275–279. (In Russ.).

8. Tsygankova G. A., Maiorov E. E., Kolesnichenko S. V., Konstantinova A. A., Mashek A. Ch., Pisareva E. A. Experimental study of the developed spectrophotometric system for studying the optical properties of liquid-phase media of the food industry. *Instruments*. 2022;(3(261)):22–28. (In Russ.).
9. Maiorov E. E. Application of colorimetric systems for quality control of paper products. Modeling and situational quality management of complex systems: Collection of reports of the III All-Russian scientific conference. SPb.: SUAI; 2022, pp. 56–58. (In Russ.).
10. Maiorov E. E. Measurement of the optical parameters of the paint layer with a colorimetric device. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie vuzov. Instrumentation*. 2022;65(6):413–419. (In Russ.).
11. Maiorov E. E., Pushkina V. P., Arefyev A. V., Borodyansky Yu. M., Dagaev A. V., Guliyev R. B. Investigation of medical liquid-phase media using a spectrophotometer with a wavelength range of 200...780 nm. *Medical equipment*. 2023;(1):53–55. (In Russ.).
12. Maiorov E. E., Borodyansky Yu. M., Dagaev A. V., Kurlov V. V., Tayurskaya I. S. Investigation of color diffuse reflectors using a laboratory colorimetric installation. *Instruments*. 2023;(7(277)):30–35. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Майоров Евгений Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – физическая оптика, оптическое приборостроение.

Пушкина Вера Павловна, кандидат экономических наук, доцент кафедры высшей математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – системный анализ и управление, математическое моделирование нелинейных процессов.

Гулиев Рамиз Балахан оглы, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – математический анализ сложных процессов.

Maiorov Evgeny E., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Mathematics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – physical optics, optical instrumentation.

Pushkina Vera P., PhD. in Economics, Associate Professor at the Department of Higher Mathematics and Mechanics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – system analysis and management, mathematical modeling of nonlinear processes.

Guliyev Ramiz B., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Mathematics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – mathematical analysis of complex processes.

Поступила в редакцию 26.11.2023

Поступила после рецензирования 02.12.2023

Принята к публикации 29.01.2024

Received 26.11.2023

Revised 02.12.2023

Accepted 29.01.2024

Контроль качества медной руды с помощью метода лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии

Татьяна Сергеевна Мисникова¹

✉ misnikovatatyana@yandex.ru, orcid.org/0009-0005-9933-3917, SPIN-код: 2644-9612

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Аналитические методы крайне востребованы в горнодобывающей отрасли, которая является одной из ключевых отраслей российской промышленности. Они выполняют важные функции мониторинга, измерения и контроля технологических процессов, которые необходимы для оптимальной работы. Одним из методов, который может помочь в определении качества сырья, является лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия (ЛИЭС). В данной работе предлагается использовать ЛИЭС-метод для определения присутствия меди в пробах горнодобывающей промышленности. Для этой задачи был собран экспериментальный макет, выбрана оптическая схема эксперимента и определены параметры лазерного излучения. Были изготовлены таблетки из гипсовой основы с включениями меди, проведены тестовые измерения спектров плазмы, образующейся на поверхности таблеток, и была определена медь (Cu(I)) на длине волны 324,7 и 327,3 нм.

Ключевые слова: лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия, спектральная характеристика, спектральный анализ, медь

Для цитирования: Мисникова Т. С. Контроль качества медной руды с помощью метода лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 1. С. 22–27. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-22-27.

Original article

Quality control of copper ore using laser-induced breakdown spectroscopy technique

Tatyana S. Misnikova¹

✉ misnikovatatyana@yandex.ru, orcid.org/0009-0005-9933-3917, SPIN-code: 2644-9612

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Analytical methods are highly demanded in the mining industry, which is one of the key sectors. They fulfil an important function of monitoring, measuring and controlling the processes that are necessary for optimal operation. One of the methods that can help in determining the quality of raw materials is of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). This paper proposes to use the LIBS method to determine the presence of copper in mining samples. For this task, an experimental layout was assembled, the optical scheme of the experiment was selected and the parameters of laser radiation were determined. Tablets from gypsum base with copper inclusions were made, test measurements of plasma spectra formed on the surface of tablets were carried out and copper (Cu(I)) was determined at wavelengths of 324.7 and 327.3 nm.

Keywords: Laser-induced breakdown spectroscopy, spectral characterisation, spectral analysis, copper

For citation: Misnikova T. S. Quality control of copper ore using laser-induced breakdown spectroscopy technique. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(1):22–27. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-22-27.

Введение

Аналитические методы крайне востребованы в горнодобывающей промышленности, которая является одной из ключевых отраслей российской промышленности. Они выполняют важную функцию мониторинга, измерения и контроля технологических процессов, которые необходимы для оптимальной работы. Одним из методов, который может помочь в определении качества сырья, является лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия (ЛИЭС). Этот метод позволяет

анализировать состав материалов в режиме реального времени на расстоянии. Однако чтобы использовать этот метод на практике, необходимо адаптировать его к конкретным технологическим процессам, разработать новые инструменты и методики анализа данных.

ЛИЭС-метод – это новый метод анализа химического состава материалов, который позволяет проводить дистанционный спектральный анализ любого агрегатного состояния материала. Этот метод является формой бесконтактной оптической спектроскопии, которая исключает

прямой контакт между спектральным прибором и источником оптического сигнала с помощью волоконно-оптической системы передачи [1]. Этот метод является весьма востребованным и продолжает находить новые сферы применения, что подчеркивает его инновационный характер и перспективность.

Одно из главных преимуществ ЛИЭС-метода – его способность проводить одновременный многоэлементный качественный и количественный анализ химического состава материала в любом агрегатном состоянии, включая экспресс-анализ. Этот метод также обладает возможностями бесконтактной оптической спектроскопии и способен проводить анализ в режиме реального времени, что позволяет изучать элементный состав образцов на расстоянии, которые находятся в твердом состоянии [2, 3]. Благодаря этому ЛИЭС-метод уже используется в диагностике и контроле различных технологических процессов, и его применение может быть расширено в будущем.

В данной работе предлагается возможность использования ЛИЭС-метода для определения присутствия меди в пробах горнодобывающей промышленности.

Постановка задачи спектроскопического контроля включений меди в веществах методом лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии

На сегодняшний день ЛИЭС-метод является одним из ключевых методов изучения взаимодействия лазерного излучения с различными материалами. Данный метод обладает множеством преимуществ, среди которых – высокая скорость анализа, простота проведения экспериментов, отсутствие необходимости в предварительной подготовке образцов, возможность проведения экспресс-анализов и анализов в режиме реального времени, а также способность к проведению многоэлементного анализа.

ЛИЭС-метод основан на измерении спектров излучения, возникающего при образовании и развитии плазмы под воздействием мощного лазерного импульса на вещество [1]. Для создания плазмы обычно используются наносекундные и фемтосекундные лазеры.

Плазма образуется при помощи наносекундных и фемтосекундных лазеров, которые создают тепловые процессы для образования зоны теплового воздействия в материале. Абляция с использованием наносекундных лазеров не является стехиометрической, что означает, что размер

частиц, образованных в процессе абляции, может варьироваться. Эти частицы подвергаются воздействию аналитической плазмы, температура и плотность которой зависят от энергии лазерного импульса и его длины волны. Эмиссию плазмы необходимо калибровать для каждого конкретного материала, чтобы получить точные результаты анализа [3, 4].

ЛИЭС-метод успешно применяется для обнаружения и идентификации металлов в составе различных веществ, что представлено в работах [3–9]. Данный метод может использоваться для идентификации включений металлов в веществах. Поскольку медь является одним из наиболее широко используемых металлов в промышленных процессах, именно ее присутствие было выбрано для демонстрации эффективности лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии. Два самых ярких пика для меди наблюдаются на длинах волн 324,7 и 327,3 нм. Исходя из этого, можно сделать вывод об успешности эксперимента.

Для решения задачи проведения спектроскопического контроля элементов в горнодобывающей промышленности предлагается создать экспериментальный макет на основе ЛИЭС-метода, определить оптимальные параметры лазерного излучения, провести пробные измерения выбросов плазмы на предварительно подготовленных образцах таблеток и определить пики меди в спектральных характеристиках.

Подготовка образцов для экспериментального макета

Для эксперимента были изготовлены три таблетки, основой в которых был гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Гипс был выбран как среда для включений меди, поскольку соединения кальция, серы и водорода достаточно часто встречаются почвах, что соответствует запросу горнодобывающей промышленности. Таблетка 1 была изготовлена только из гипса для определения спектра фона, таблетки 2 (Cu – 7 %) и 3 (Cu – 3,4 %) были изготовлены с включениями стружки от медной трубки с различным процентным содержанием примеси металла в таблетке и равномерным его распределением его по образцу. Фотографии таблеток приведены на рис. 1.

Для чистоты эксперимента использовалась медная пластина (Cu – 99 % и P – 1 %), показанная на рис. 2.

В спектре таблеток можно ожидать появления пиков железа. Вероятно, это связано с нарушени-



• Рис. 1. Фотография таблетки гипса (1) и таблеток гипса с включениями меди (2, 3)
 • Fig. 1. Photograph of gypsum tablet (1) and gypsum tablets with copper inclusions (2, 3)



• Рис. 2. Фотография медной пластины
 • Fig. 2. Photograph of a copper plate

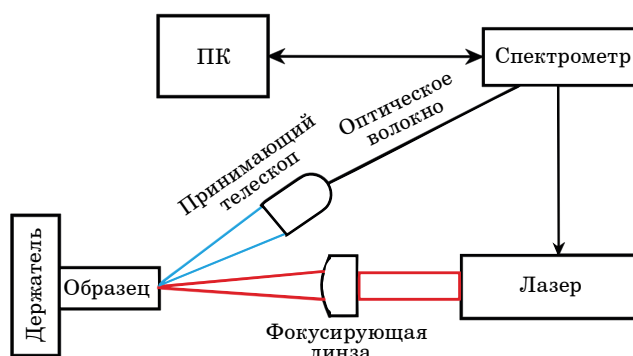
ем стерильности при производстве таблеток, в результате чего железные примеси могли попасть в таблетки из прессы.

Макет для проведения эксперимента по определению включений меди в таблетках

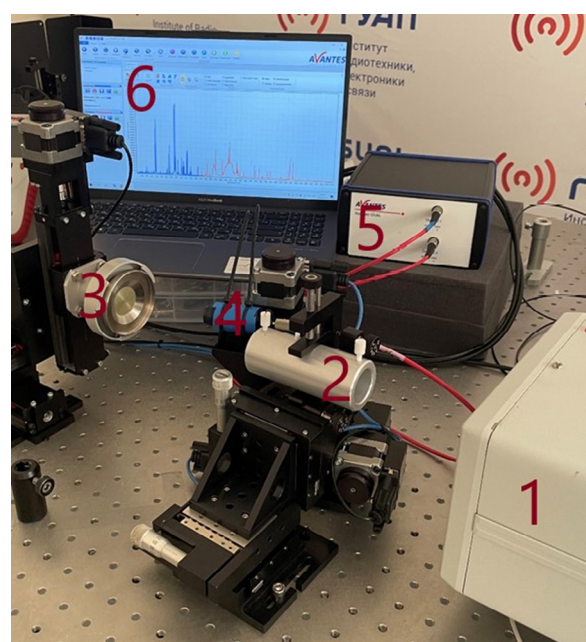
В рамках эксперимента была определена оптическая схема, и подобраны энергетические параметры лазерного излучения.

На рис. 3 показан экспериментальный макет, включающий в себя твердотельный лазер LOTIS II с длиной волны генерации 1064 нм, фокусирующую линзу в виде дублета с воздушной прослойкой АСА254-150-1064, держатель для таблеток на моторизованном оптическом столе, оптический телескоп с оптическим волокном и двухканальный спектрометр AvaSpec-ULS4096CL-2-EVO с рабочими диапазонами 240–1030 нм. Установка управляется персональным компьютером (ПК).

Лазерный пучок с энергией импульса 265 мДж и частотой следования импульсов 1 Гц с помощью дублета с воздушной прослойкой АСА254-150-1064 фокусируется на образце на расстоянии 150 мм, тем самым создавая плазму на поверхности таблетки. Принимающий телескоп передает свечение плазмы на оптическое волокно, а далее



• Рис. 3. Схема экспериментального макета
 • Fig. 3. Schematic diagram of the experimental layout



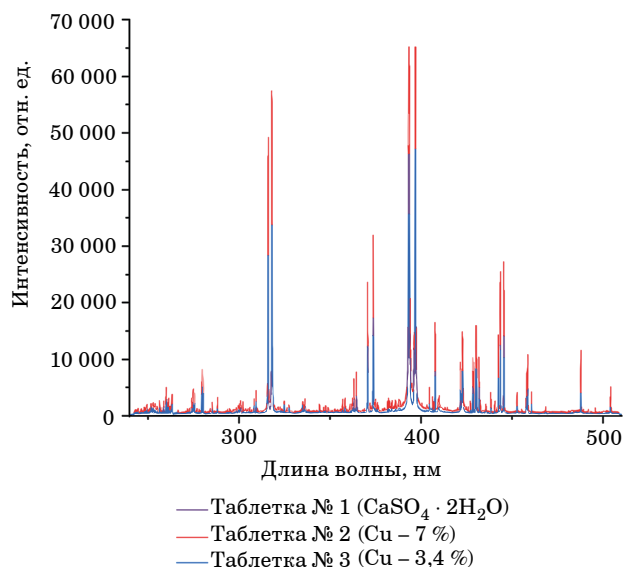
• Рис. 4. Фотография экспериментального макета. Пояснения даны в тексте
 • Fig. 4. Photograph of the experimental layout. Explanations are given in the text

на спектрометр, который отправляет полученную спектроскопическую информацию для отображения на ПК.

На рис. 4 показана фотография экспериментальной установки, где 1 – Nd:YAG-лазер LOTIS II; 2 – фокусирующая линза-дублет АСА254-150-1064; 3 – держатель таблеток; 4 – оптический телескоп с оптическим волокном; 5 – спектрометр AvaSpec-ULS4096CL-2-EVO; 6 – ПК.

Результаты эксперимента

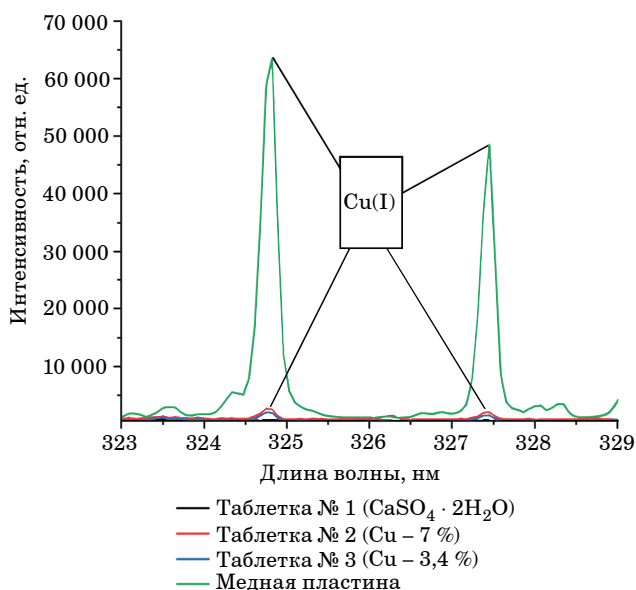
На рис. 5 показан общий вид спектральных характеристик излучения плазмы, образующейся на поверхностях таблеток 1, 2 и 3. Для улуч-



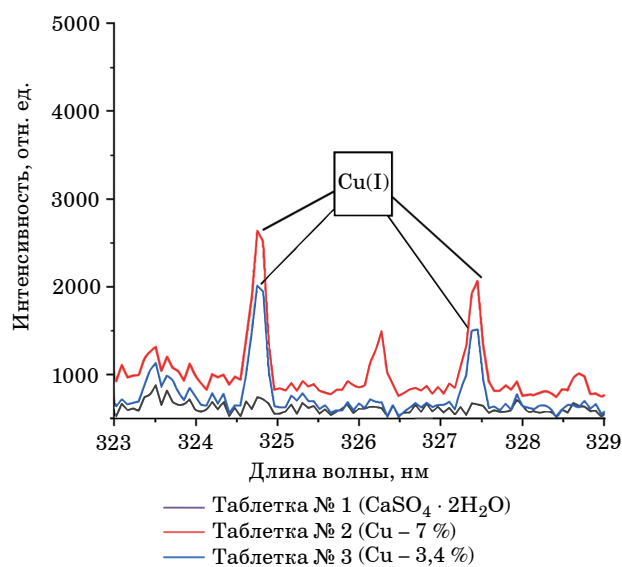
• Рис. 5. Общий вид спектральных характеристик излучения плазмы, образованных на поверхностях таблеток 1, 2 и 3
 • Fig. 5. General view of the spectral characteristic of the radiation emission of the plasma formed on the surface of tablets 1, 2 and 3

шения соотношения «сигнал/шум» спектральные характеристики были получены путем усреднения десяти измерений.

Как было сказано выше, в спектрах таблеток ожидаемо появились пики железа, но они не мешали определить Cu(I) на 324,7 и 327,3 нм. В этом можно удостовериться, используя спектральную характеристику медной пластины как эталон (рис. 6).



• Рис. 6. Идентификация включений меди в таблетках
 • Fig. 6. Identification of copper inclusions in tablets



• Рис. 7. Разница интенсивности линий Cu(I) на 324,7 и 327,3 нм при разных концентрациях включения меди
 • Fig. 7. Intensity difference of Cu(I) lines at 324.7 and 327.3 nm at different Cu inclusion concentrations

Анализируя полученный результат, можно заметить заметную разницу интенсивности спектральных линий Cu(I) на 324,7 и 327,3 нм при разных концентрациях включения меди в таблетках (рис. 7). Чем больше концентрация меди в таблетках, тем интенсивнее спектральная линия.

Данное наблюдение поможет в дальнейшем использовать представленный макет для количественного спектрального анализа веществ, тем более что он вызывает наибольший интерес в спектральном анализе. На данном этапе не представляется возможным представить адекватные результаты количественного анализа, поскольку невозможно построить градуировочный график по двум точкам. Для этой задачи необходимо изготовить еще несколько таблеток с различным процентом содержания меди, при этом добиться максимальной стерильности на производстве, и провести дополнительные измерения.

Заключение

В данной работе показана возможность применения ЛИЭС-метода для решения задачи обеспечения качественного контроля материалов или руд в горнодобывающей промышленности. В частности, рассматривается идентификация меди (Cu(I)) на 324,7 и 327,3 нм, которая является одним из наиболее часто используемых металлов в производственных процессах.

В рамках работы был собран экспериментальной макет, выбрана оптическая схема эксперимента

и определены параметры лазерного излучения. Были изготовлены таблетки из гипсовой основы. Гипс был выбран как среда для включений меди, поскольку соединения кальция, серы и водорода достаточно часто встречаются почвах, что соответствует запросу горнодобывающей промышленности. Были проведены тестовые измерения спектров плазмы, образующейся на поверхности таблеток.

В результате эксперимента были обнаружены характерные спектроскопические параметры в виде ярких спектральных линий, соответствую-

щих меди (Cu(I)), на длинах волн 324,7 и 327,3 нм. Это подтверждает возможность использования ЛИЭС-метода для спектроскопического анализа элементного состава в горнодобывающей отрасли. Стоит отметить, что заметна разница интенсивности спектральных линий Cu(I) на 324,7 и 327,3 нм при разных концентрациях включения меди в таблетках. В дальнейшем развитии работы можно будет использовать экспериментальный макет для проведения количественного спектрального анализа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Steven B., Francesco F., Gregg L. Combustion system analysis using laser-induced breakdown spectroscopy // International congress on applications of lasers & electro-optics. 2003. Doi: 403. 10.2351/1.5060050.
2. Buckley B. Geochemical analysis using laser-induced breakdown spectroscopy // Spectroscopy. 2021. Vol. 36, is. 10. P. 9–15.
3. Nanosecond and femtosecond laser induced breakdown spectroscopic studies of coal and ash / R. Hemalaxmi, N. Aparna, N. J. Vasa, S. Seshadri // Conference on lasers and electro-optics pacific rim (CLEO-PR). 2018. P. 1–2.
4. Detection of metals in the environment using a portable laser-induced breakdown spectroscopy instrument / K. Y. Yamamoto, D. A. Cremers, M. J. Ferris, L. E. Foster // Appl. spectrosc. 1996. № 50. P. 222–233.
5. Nanosecond and femtosecond laser induced breakdown spectroscopic analysis of bronze alloys / A. Elhassan [et al.] // Spectrochimica acta. P. B: Atomic spectroscopy. 2008. № 63. P. 504–511.
6. LIBS: aux portes de la Clinique / V. Motto-Ros, M. Leprince, L. Duponchel, L. S. Imagerie // Photoniques. 2020. № 103. P. 34–37.
7. Murthy N., Salam A. S., Rao S. V. Stand-off femtosecond laser induced breakdown spectroscopy of metals, soil, plastics and classification studies // 2019 Workshop on recent advances in photonics (WRAP). 2019. P. 1–3.
8. Мисникова Т. С. Анализ элементного состава металлического сплава детали методом лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии // Датчики и системы. 2022. № 5 (264). С. 29–32. Doi: 10.25728/datsys.2022.5.5.
9. Мисникова Т. С., Ваганов М. А., Лебедев В. Ф. Применение метода лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии для контроля технологических процессов в горнодобывающей промышленности // Труды Рос. науч.-техн. об-ва радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова: Материалы 15-й Междунар. конф. (Астрахань, 3–7 окт. 2022 г.). Вып. XV. М.: Науч.-техн. центр уникального приборостроения РАН, 2022. С. 84–86. Doi: 10.25210/armimp-2022-23.

REFERENCES

1. Steven B., Francesco F., Gregg L. Combustion system analysis using laser-induced breakdown spectroscopy. International congress on applications of lasers & electro-optics. 2003. Doi: 403. 10.2351/1.5060050.
2. Buckley B. Geochemical analysis using laser-induced breakdown spectroscopy // Spectroscopy. 2021;36(10):9–15.
3. Hemalaxmi R., Aparna N., Vasa N. J., Seshadri S. Nanosecond and femtosecond laser induced breakdown spectroscopic studies of coal and ash. Conference on lasers and electro-optics pacific rim (CLEO-PR). 2018, pp. 1–2.
4. Yamamoto K. Y., Cremers D. A., Ferris M. J., Foster L. E. Detection of metals in the environment using a portable laser-induced breakdown spectroscopy instrument. Appl. spectrosc. 1996;(50):222–233.
5. Elhassan A., Giakoumaki A., Anglos D., Ingo G. M., Robbiola L., Harith M. A. Nanosecond and femtosecond laser induced breakdown spectroscopic analysis of bronze alloys. Spectrochimica acta. P. B: Atomic spectroscopy. 2008;(63): 504–511.
6. Motto-Ros V., Leprince M., Duponchel L., Imagerie L. S. LIBS: aux portes de la Clinique. Photoniques. 2020;(103): 34–37.
7. Murthy N., Salam A. S., Rao S. V. Stand-off femtosecond laser induced breakdown spectroscopy of metals, soil, plastics and classification studies // 2019 Workshop on recent advances in photonics (WRAP). 2019, pp. 1–3.

8. Misnikova T. S. Analysis of the elemental composition of the metal alloy of the part by laser-induced breakdown spectroscopy. *Sensors and systems*. 2022;(5(264)):29–32. (In Russ.). Doi: 10.25728/datsys.2022.5.5.
9. Misnikova T. S., Vaganov M. A., Lebedev V. F. Application of the method of laser-induced breakdown spectroscopy for the control of technological processes in the mining industry. /Proceedings of the Russian scientific and technical society of radio engineering, electronics and communications named after A. S. Popov: Proceedings of the 15th International conference (Astrakhan, 03–07 October 2022). Is. XV. Moscow: Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences; 2022, pp. 84–86. (In Russ.). Doi: 10.25210/armimp-2022-23.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Мисникова Татьяна Сергеевна, аспирант, ассистент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – спектральный анализ, лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия.

Misnikova Tatyana S., Postgraduate Student, Assistant at the Department of Electronic and Laser Design and Technology, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – spectral analysis, laser-induced breakdown spectroscopy.

Поступила в редакцию 24.11.2023

Поступила после рецензирования 02.12.2023

Принята к публикации 29.01.2024

Received 24.11.2023

Revised 02.12.2023

Accepted 29.01.2024

Эксперименты по контролю количества объектов на поверхности на основе обработки лазерных данных и методов распознавания с борта малых летательных аппаратов

Виктория Игоревна Афанасьева¹

victoria_afanaseva@mail.ru, orcid.org/0000-0002-6985-5133, SPIN-код: 3183-0163

Александр Александрович Залищук¹

sacha1501@yandex.ru, orcid.org/0009-0007-4733-2255, SPIN-код: 4690-7529

Вадим Александрович Ненашев¹

✉ nenashev.va@yandex.ru, orcid.org/0000-0001-5285-2051, SPIN-код: 6782-6108

Максим Юрьевич Григоров¹

mygrigorov@ya.ru, SPIN-код: 9753-2773

Александр Владимирович Морозов¹

0xf777@mail.ru

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Объектом научного исследования является алгоритм обнаружения и выделения объектов на основе обработки лазерных данных – облака точек, полученного с помощью интеллектуальной оптико-электронной системы оперативного мониторинга земной поверхности, реализуемой на базе малых летательных аппаратов. Научная работа имеет весомое практическое значение для разработки программы автоматизированного обнаружения и выделения объектов на наблюдаемой поверхности. Разработка алгоритма позволит проводить более эффективное и точное распознавание объектов на наблюдаемой поверхности, что может быть полезно в различных сферах, таких как геодезия, картография, мониторинг природных ресурсов, охрана окружающей среды, обеспечение безопасности и т. д.

Для достижения поставленной цели используются методы лазерного сканирования земной поверхности, методы глубокого обучения и извлечения признаков для классификации обнаруженных объектов на поверхности.

Проведены эксперименты по обнаружению объектов на облаке точек. В рамках экспериментов были использованы облака точек, полученные с оптико-электронных систем оперативного мониторинга земной поверхности на базе беспилотной авиационной системы (БАС). В процессе исследования разработана программа по контролю количества объектов на основе методов распознавания объектов.

Приведены результаты по обработке лазерных данных облака точек, реализуемых на базе малых БАС, что является логичным продолжением и развитием данного направления.

Ключевые слова: лазерные данные, наблюдаемая поверхность, обнаружение объектов, малый летательный аппарат, облако точек, беспилотная авиационная система

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Для цитирования: Афанасьева В. И., Залищук А. А., Ненашев В. А., Григоров М. Ю., Морозов А. В. Эксперименты по контролю количества объектов на поверхности на основе обработки лазерных данных и методов распознавания с борта малых летательных аппаратов // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 1. С. 28–35. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-28-35.

Original article

Experiments to control the number of objects on the surface based on laser data processing and recognition methods on board small aircraft

Victoria I. Afanasyeva¹

victoria_afanaseva@mail.ru, orcid.org/0000-0002-6985-5133, SPIN-code: 3183-0163

Alexander A. Zalischuk¹

sacha1501@yandex.ru, orcid.org/0009-0007-4733-2255, SPIN-code: 4690-7529

Vadim A. Nenashev¹

✉ nenashev.va@yandex.ru, orcid.org/0000-0001-5285-2051, SPIN-code: 6782-6108

Maxim Yu. Grigorov¹

mygrigorov@ya.ru, SPIN-code: 9753-2773

Alexander V. Morozov¹

Oxf777@mail.ru

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The object of scientific research is an algorithm for detecting and highlighting objects based on processing laser data – a cloud of points obtained using an intelligent optical-electronic system for operational monitoring of the earth's surface, implemented on the basis of small aircraft. Scientific work has significant practical significance for the development of a program for automated detection and selection of objects on the observed surface. The development of the algorithm will allow for more efficient and accurate recognition of objects on the observed surface, which can be useful in various fields, such as geodesy, cartography, monitoring of natural resources, environmental protection, security, etc.

To achieve this goal, methods of laser scanning of the earth's surface, deep learning and feature extraction methods are used to classify detected objects on the surface.

Experiments were carried out on object detection based on processing laser data – point clouds. As part of these experiments, point clouds obtained from optical-electronic systems for operational monitoring of the earth's surface based on UAS were used. As part of the study, a program was developed to control the number of objects based on object recognition methods.

The presented results on processing laser point cloud data implemented on the basis of small naval aircraft are a logical continuation and development of this direction.

Keywords: laser data, observed surface, object detection, small aircraft, point cloud, unmanned aviation system

Acknowledgments. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement no. FSRF-2023-0003 "Fundamental principles for the construction of noise-resistant systems for space and satellite communications, relative navigation, technical vision and aerospace monitoring".

For citation: Afanasyeva V. I., Zalischuk A. A., Nenashev V. A., Grigorov M. Yu., Morozov A. V. Experiments to control the number of objects on the surface based on laser data processing and recognition methods on board small aircraft. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(1):28–35. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-28-35.

Введение

Распознавание объектов является важной задачей в сферах геодезии, картографии, контроля природных ресурсов, охраны окружающей среды, обеспечения безопасности и в других областях. Одним из методов, позволяющих эффективно и точно распознавать объекты на поверхности, является обработка лазерных данных.

В данной работе основное внимание уделяется алгоритму обнаружения и выделения объектов на основе обработки облака точек, полученного с помощью интеллектуальных оптико-электронных систем контроля земной поверхности, на базе малых летательных аппаратов (ЛА).

В рамках исследования было проведено два эксперимента по обнаружению автомобилей и грузовиков и контролю количества деревьев.

Эксперимент по обнаружению автомобилей и грузовиков

Для эксперимента использован открытый набор данных PandaSet от Hesai и Scale. PandaSet содержит 8240 сканирования земной поверхности [1]. Набор данных обеспечивает 3D-метки ограничительной рамки для 18 различных классов наземных объектов, включая автомобиль, грузовик и пешехода.

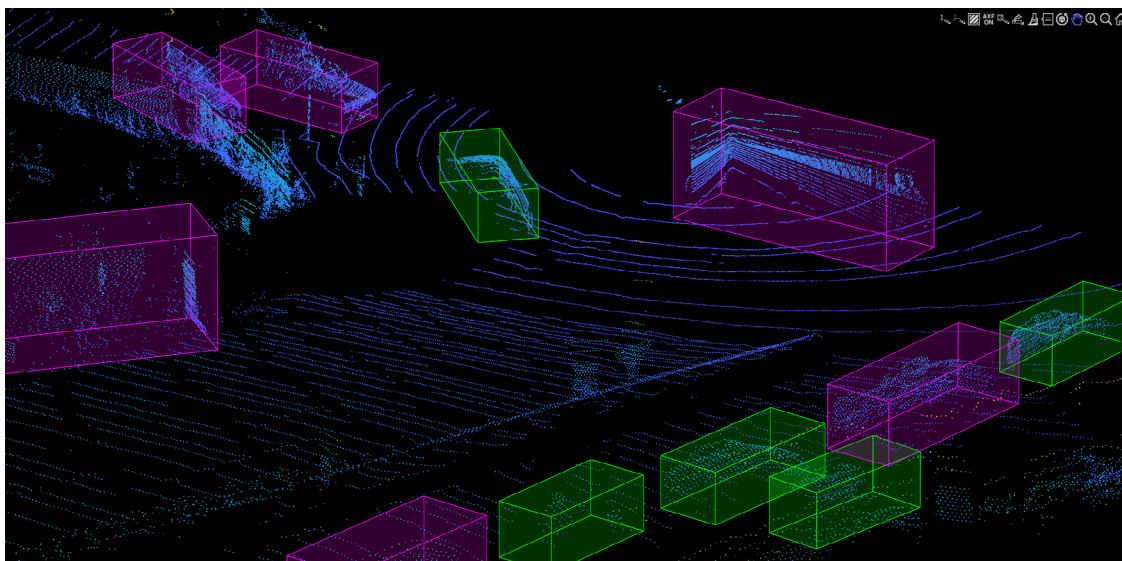
При выполнении данного эксперимента использована заранее обученная нейронная сеть,

что позволило получить результат, показанный на рис. 1.

В начале эксперимента следует подготовить материал для обработки: необходимо загрузить набор данных, который содержит облака точек, полученных с бортового лидара. Затем эти загруженные данные предобработываются, в результате чего происходит выравнивание облаков точек с помощью алгоритма ICP, после чего точки проецируются на двумерную сетку [2]. Это позволяет ускорить обработку данных и уменьшить объем входных данных для нейросети.

Затем применяется предобученная сеть PointPillars [2], осуществляющая обработку облака точек для обнаружения объектов на наблюдаемой поверхности [3–5]. Нейросеть работает следующим образом: сначала каждая точка проецируется на двумерную плоскость, а затем они объединяются в «пилярные» области. Для каждой «пилярной» области сеть создает признаковое описание, которое затем используется для обнаружения наземных объектов интереса.

После обработки данных нейросетью PointPillars формируется список обнаруженных объектов. Для каждого объекта определяются его расположение, размеры и ориентация. Эта информация может быть использована для дальнейшей обработки показателей, например, для определения траектории движения объекта или для прогнозирования его маршрута.



- *Рис. 1. Облако точек и распознанные объекты*
- *Fig. 1. Point cloud and recognized objects*

В результате распознанные и найденные объекты были выделены в объемную рамку и классифицированы как автомобиль и грузовик (рис. 1).

Эксперимент по обнаружению и подсчету количества деревьев

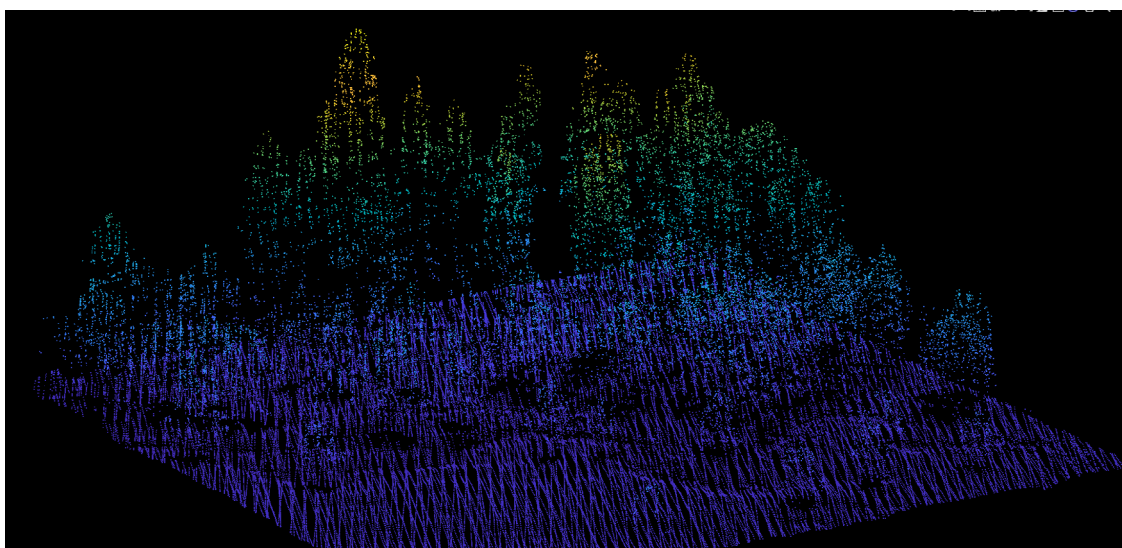
Для проведения эксперимента по контролю количества деревьев использовали данные облака точек из файла формата LAZ, созданного в результате полетов с малогабаритной бортовой лазерной системы. Сначала были извлечены показатели леса путем классификации облака точек

по наземным и растительным объектам, а затем были извлечены отдельные атрибуты деревьев [6] путем сегментации растительности на каждом дереве.

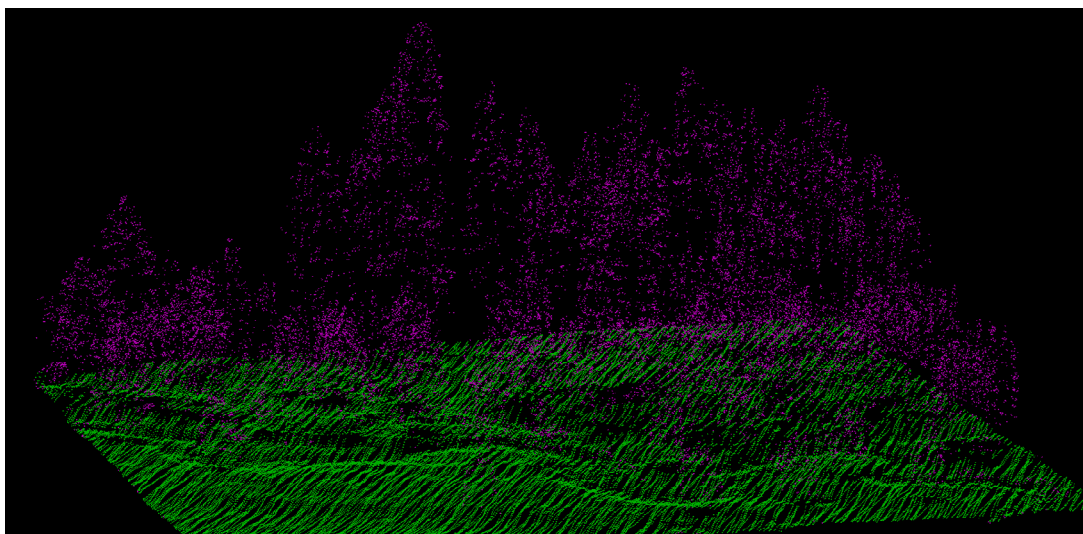
Данные для эксперимента были получены из открытого набора данных, и облако точек в основном содержит точки земли и растительности (рис. 2).

На рис. 3 показаны результаты обработки облака точек, где выделены данные о растительности на основе методов сегментации и извлечены сведения о лесных показателях.

Для устранения влияния рельефа применен подход, в результате которого была осуществлена



- *Рис. 2. Визуализация облака точек*
- *Fig. 2. Point cloud visualization*



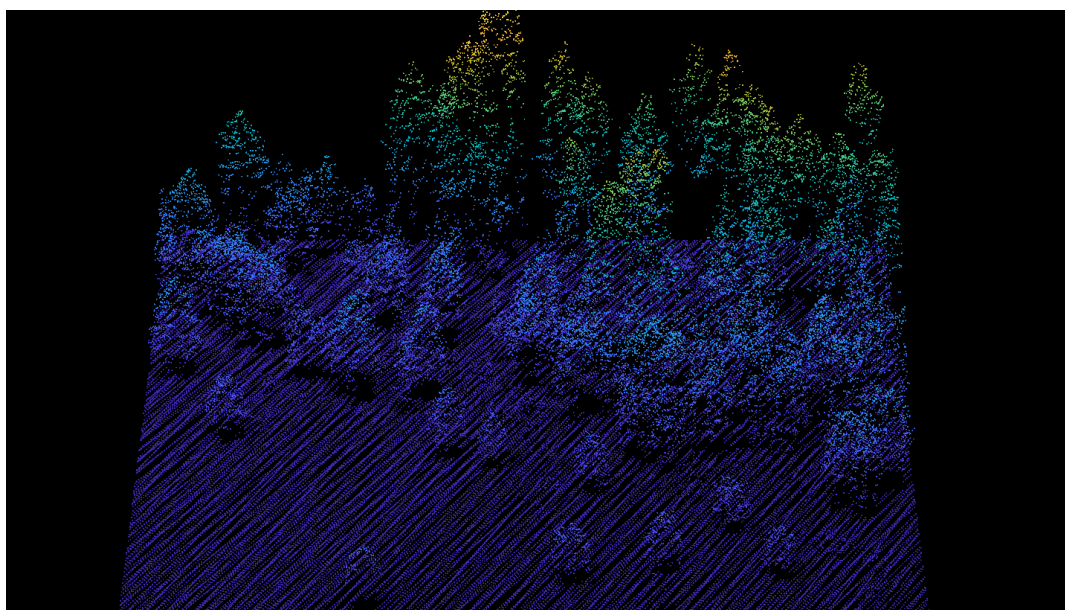
- *Рис. 3. Сегментация земной поверхности*
- *Fig. 3. Segmentation of the Earth's surface*

нормализация высот. Для вычисления показателей леса и параметров деревьев были использованы точки с нормализованной высотой в качестве входных данных. Далее устранены повторяющиеся точки вдоль осей Ox и Oy . Применена интерполяция для оценки местоположения каждого отдельного дерева в облаке точек, что показано на рис. 4 [7].

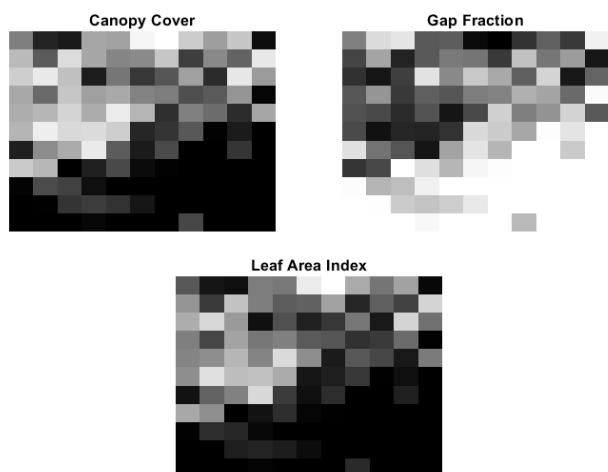
Само же извлечение лесных характеристик происходит следующим образом. Облако точек делится на сетки согласно заданному размеру, и в каждом секторе вычисляются собственные по-

казатели леса. Предполагается, что точки с нормализованной высотой ниже заданной высоты среза являются землей, а остальные – растительностью.

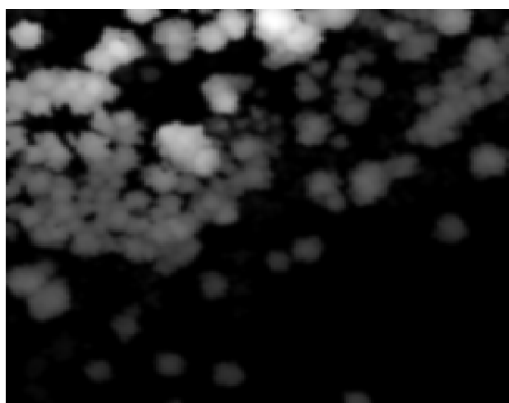
На рис. 5 показаны методы оценки различных характеристик леса, основанные на анализе данных из облака точек. К примеру, пологий покров – это доля леса, покрытая вертикальной проекцией крон деревьев. Доля просветов (Gap fraction) описывает вероятность прохождения лазерного луча сквозь крону деревьев без контакта с листьями или другими частями растений, ее можно рассчи-



- *Рис. 4. Нормализация высот*
- *Fig. 4. Normalization of heights*



- *Рис. 5. Извлечение показателей леса*
- *Fig. 5. Extraction of forest indicators*



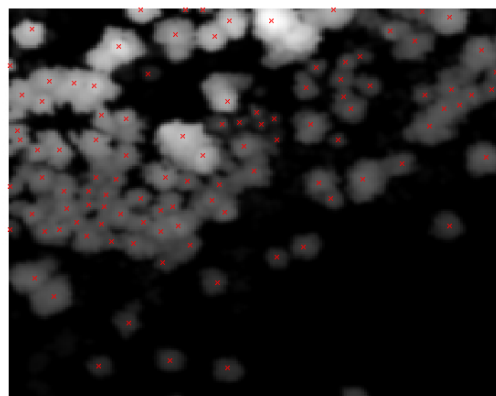
- *Рис. 6. Модель крон деревьев*
- *Fig. 6. Model of tree crowns*

тать, сравнив количество лучей, достигающих земли, с общим числом отражений. Индекс площади листьев (Leaf area index, LAI) показывает общую площадь листьев на единицу земельной площади.

Модели высоты крон деревьев представляют собой растровые представления высоты деревьев, зданий и других сооружений над рельефом местности. Эти модели были применены в качестве входных данных для обнаружения деревьев и их сегментации (рис. 6).

Обнаружение вершин деревьев производилось через локальные максимумы в пределах размеров моделей. Для определения вершины дерева была применена вспомогательная функция, которая рассматривает только точки с нормализованной высотой, превышающей минимальный заданный параметр.

Для выделения всех деревьев используется управляемая маркером сегментация, которая позволяет выделить каждое отдельное дере-



- *Рис. 7. Обнаружение вершин деревьев*
- *Fig. 7. Tree top detection*

во. Сначала создается двоичное изображение маркера, где вершины деревьев помечены значением «1». Затем применяется фильтрация по наложению минимумов к дополнению модели, чтобы удалить минимумы, которые не являются вершинами дерева. После этого выполняется сегментация на отфильтрованном дополнении модели, чтобы разделить отдельные деревья. В конце визуализируются отдельные сегменты дерева (рис. 8).

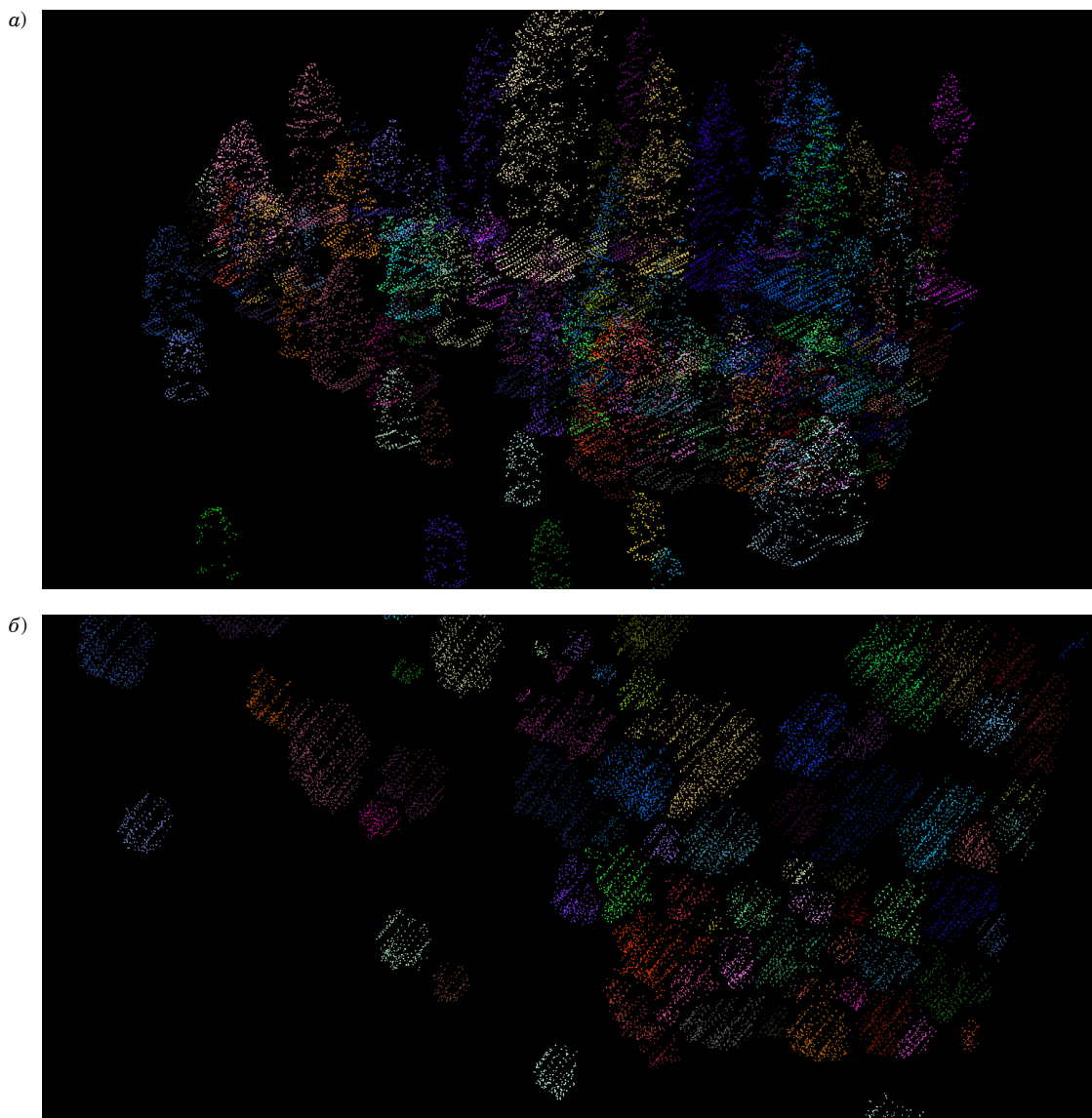
Для определения отдельных атрибутов дерева [8] следует идентифицировать точки, принадлежащие отдельным деревьям, по меткам. Затем извлекаются атрибуты дерева, такие как расположение вершины дерева вдоль осей Ox и Oy , высота, диаметр кроны и площадь дерева и т. д. (рис. 9).

Таким образом, проведен эксперимент по контролю количества деревьев – 64, а также определена следующая информация о каждом из деревьев:

- количество точек каждого дерева;
- координата вершины дерева по оси Ox ;
- координата вершины дерева по оси Oy ;
- высота дерева;
- диаметр кроны;
- площадь кроны.

Заключение

В современных условиях, когда требования к системам контроля природных сред земной поверхности, реализуемых на базе малых ЛА, постоянно ужесточаются, целесообразным является использование алгоритмов обработки лазерных данных для обнаружения, классификации и определения координат наземных объектов [9]. Использование подобных систем контроля может быть полезно при выполнении поисково-



• *Рис. 8. Обнаружение отдельных деревьев: а – вид сбоку; б – вид сверху*
 • *Fig. 8. Detection of individual trees: a – side view; б – top view*

TreeId	NumPoints	TreeApexLocX	TreeApexLocY	TreeHeight	CrownDiameter	CrownArea
1	374	2.6867e+05	4.1719e+06	29.512	7.378	42.753
2	22	2.6867e+05	4.1719e+06	21.475	0.9905	0.77055
3	350	2.6867e+05	4.1719e+06	24.216	6.9822	38.289
4	53	2.6867e+05	4.1719e+06	19.509	3.1956	8.0204
5	117	2.6867e+05	4.1719e+06	19.399	4.0265	12.733

• *Рис. 9. Характеристики деревьев*
 • *Fig. 9. Characteristics of trees*

спасательных операций в удаленных районах, а также при решении задач поиска людей в зонах бедствий [10].

В рамках данного исследования были проведены эксперименты, в которых использованы реальные лазерные данные в виде облака точек,

полученного с оптико-локационного устройства, которое базируется на малом летательном аппарате.

Достигнута цель исследования, а именно – исследованы методы для реализации алгоритмов контроля природной среды, реализована проце-

дура сегментации облака точек, проведены соответствующие эксперименты по обнаружению и сегментации наземных объектов, а также по

подсчету их количества и определению характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. «PandaSet» by hesai and scale AI // Pandaset. URL: <https://pandaset.org/> (дата обращения: 05.04.2023).
2. Крючкова Т. Н., Ефимов А. И. Совмещение трехмерных облаков точек: итеративный алгоритм ближайших точек // Методы и средства обработки и хранения информации: межвуз. сб. науч. тр. Рязань, 2022. С. 123–128.
3. PointPillars: fast encoders for object detection from point clouds // arXiv vanity. URL: <https://www.arxiv-vanity.com/papers/1812.05784/> (дата обращения: 05.04.2023).
4. Ненасhev В. А., Сергеев А. М., Васильев И. А. Моделирование сложных кодо-модулированных сигналов для современных систем обнаружения и передачи информации // Научная сессия ГУАП: сб. докл. науч. сессии. СПб.: ГУАП, 2019. С. 413–417.
5. Comparative characteristics of anticollision processing of radio signal from identification tags on surface acoustic waves / A. V. Sorokin, A. P. Shepeta, V. A. Nenashev, G. M. Wattimena // Information and control systems. 2019. № 1. P. 49–57.
6. Алексеев Е. П. Построение 3D-модели растений // Научно-образовательная среда как основа развития интеллектуального потенциала сельского хозяйства регионов России: Материалы II Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 9 сент. 2022 г.). Чебоксары: Чуваш. гос. аграр. ун-т, 2022. С. 303–305.
7. Afanaseva V. I. Creation of 3D terrain models based on lidar survey // Bulletin of the UNESCO department «Distance education in engineering» of the SUAI: collection of the papers. Is. 8. SPb.: SUAI, 2023. P. 23–26.
8. Афанасьева В. И. Классификация наблюдаемых зон на сформированных снимках потока видеокадров на основе сегментации в бортовых системах мониторинга земной поверхности // 74-я Междунар. студ. науч. конф. ГУАП (19–23 апр. 2021 г.): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2021. С. 126–133.
9. Ткачева А. А. Использование данных дистанционного зондирования Земли при трехмерном моделировании естественных ландшафтных сцен // Вестн. Сибир. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. 2014. № 5 (57). С. 136–144.
10. Рыжков К. А., Горина А. В., Нестеренко И. В. Возможности использования беспилотных летательных аппаратов в геодезических работах // Студент и наука. 2019. № 1. С. 83–87.

REFERENCES

1. “PandaSet” by hesai and scale AI. Pandaset. Available from: <https://pandaset.org/> [Accessed 05 April 2023].
2. Kryuchkova T. N., Efimov A. I. Alignment of three-dimensional point clouds: iterative algorithm of the nearest points. Methods and means of information processing and storage: interuniversity collection of scientific papers. Ryazan; 2022, pp. 123–128. (In Russ.).
3. PointPillars: fast encoders for object detection from point clouds // arXiv vanity. Available from: <https://www.arxiv-vanity.com/papers/1812.05784/> [Accessed 05 April 2023].
4. Nenashev V.A., Sergeev A. M., Vasiliev I. A. Modeling of complex code-modulated signals for modern information detection and transmission systems. Scientific session of SUAI: collection. report scientific sessions. SPb.: SUAI; 2019, pp. 413–417. (In Russ.).
5. Sorokin A. V., Shepeta A. P., Nenashev V. A., Wattimena G. M. Comparative characteristics of anticollision processing of radio signal from identification tags on surface acoustic waves. Information and control systems. 2019;(1):49–57. (In Russ.).
6. Alekseev E. P. Construction of 3D-model of plants. Proceedings of the II International scientific and practical conference (Cheboksary, September 09, 2022): scientific and educational environment as a basis for the development of intellectual potential of agriculture in the regions of Russia. Cheboksary: Chuvash State Agrarian University; 2022, pp. 303–305. (In Russ.).
7. Afanaseva V. I. Creation of 3D terrain models based on lidar survey. Bulletin of the UNESCO department “Distance education in engineering” of the SUAI: collection of the papers. Is. 8. SPb.: SUAI; 2023, pp. 23–26. (In Russ.).
8. Afanasyeva V. I. Classification of the observed zones on the formed images of the video frame stream based on segmentation in the onboard systems for monitoring the Earth surface. 74th International student scientific conference of SUAI (April 19–23, 2021): collection of reports. SPb.: SUAI; 2021, pp. 126–133. (In Russ.).

9. Tkacheva A. A. Use of Earth remote sensing data in three-dimensional modeling of natural landscape scenes. Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. 2014;(5(57)):136–144. (In Russ.).
10. Ryzhkov K. A., Gorina A. V., Nesterenko I. V. Possibilities of using unmanned aerial vehicles in geodetic works. Student and science. 2019;(1):83–87. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Афанасьева Виктория Игоревна, младший научный сотрудник кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – компьютерное зрение, комплексная обработка данных.

Залищук Александр Александрович, младший научный сотрудник кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – обнаружение и классификация объектов на оптических изображениях с применением технологий компьютерного зрения и машинного обучения.

Ненашев Вадим Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – компьютерное моделирование, системы бортовой радиолокации, статистический анализ, электродинамика.

Григоров Максим Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – компьютерное моделирование и проведение экспериментов.

Морозов Александр Владимирович, младший научный сотрудник кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – компьютерное моделирование, программное обеспечение.

Afanasyeva Victoria I., Researcher Assistant at the Department of Design and Technologies of Electronic and Laser Equipment, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – computer vision, complex data processing.

Zalischuk Alexander A., Researcher Assistant at the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Equipment, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – classification and detection of objects in optical images using computer vision and machine learning technologies.

Nenashev Vadim A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Equipment, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – computer modeling, airborne radar systems, statistical analysis, electrodynamic.

Grigorov Maxim Yu., PhD in Technical Sciences, Senior Researcher at the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Equipment, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – computer modeling and experimentation.

Morozov Alexander V., Researcher Assistant at the Department of Design and Technologies of Electronic and Laser Equipment, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – computer modeling, software.

Поступила в редакцию 01.12.2023

Поступила после рецензирования 02.12.2023

Принята к публикации 29.01.2024

Received 01.12.2023

Revised 02.12.2023

Accepted 29.01.2024

Интегрированная система контроля технического состояния авиационного двигателя на базе спектроскопических измерений

Ксения Владимировна Сердюк¹

✉ kserdiuk@yandex.ru, orcid.org/0000-0001-7826-3896, SPIN-код: 3819-0248

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Внедрение встроенных систем контроля технического состояния планера самолета, силовой установки и бортовых систем играет ключевую роль в повышении безопасности полетов и сокращении расходов на техническое обслуживание. Эти системы позволяют обнаруживать износ и повреждения авиационных двигателей, контролировать использование ресурса и оценивать состояние компонентов. Однако существующие методы диагностики износа двигателей недостаточно учитывают влияние внешних факторов на их состояние, а с увеличением сложности конструкции и требований к техническому обслуживанию необходимо разработать более надежные и продвинутые системы контроля технического состояния. Датчики различных видов собирают информацию о работе двигателя, включая температуру, давление газа, вибрацию, скорость вращения ротора, наличие твердых частиц в масле, расход топлива и воздуха, концевой зазор лопаток и другие параметры. Эти данные могут быть использованы совместно с контрольно-измерительной аппаратурой других систем двигателя, таких как автоматическое управление и противопожарная система. Предлагается использовать многоальтернативную систему контроля технического состояния авиационного двигателя с применением брэгговской решетки в качестве измерительного устройства. Применение встроенных систем контроля имеет важное значение для обеспечения безопасности и снижения затрат на обслуживание.

Ключевые слова: многоальтернативная система контроля, контроль технического состояния авиационного двигателя, силовые устройства, брэгговская решетка, спектральный анализ

Для цитирования: Сердюк К. В. Интегрированная система контроля технического состояния авиационного двигателя на базе спектроскопических измерений // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 1. С. 36–41. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-36-41.

Original article

Integrated system of aircraft engine technical condition control based on spectroscopic measurements

Kseniia V. Serdiuk¹

✉ kserdiuk@yandex.ru, orcid.org/0000-0001-7826-3896, SPIN-code: 3819-0248

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The implementation of in-built condition monitoring systems for aircraft airframe, propulsion and onboard systems plays a key role in improving flight safety and reducing maintenance costs. These systems can detect wear and damage to aircraft engines, monitor service life utilisation and assess the condition of components. However, existing engine wear diagnosis methods do not sufficiently account for the influence of external factors on engine condition, and with increasing design complexity and maintenance requirements, more reliable and advanced condition monitoring systems need to be developed. Sensors of various kinds collect information about engine operation, including temperature, gas pressure, vibration, rotor speed, solids in oil, fuel and air flow, blade end clearance, and other parameters. This data can be used in conjunction with instrumentation of other engine systems such as automatic controls and fire protection system. It is proposed to use a multi-alternative system for monitoring the technical condition of an aircraft engine using a Bragg grating as a measuring device. The use of inbuilt monitoring systems is important to ensure safety and reduce maintenance costs.

Keywords: multi-alternative control system, aircraft engine technical condition control, power devices, Bragg grating, spectral analysis

For citation: Serdiuk K. V. Integrated system of aircraft engine technical condition control based on spectroscopic measurements. *Innovacionnoe priboroostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(1):36–41 (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-36-41.

Введение

Применение интегрированных систем контроля технического состояния составляющих частей самолета позволяет обеспечить высокую надежность и ремонтпригодность авиационной техни-

ки. Система контроля используется для проверки авиационных двигателей, выявления повреждений и неисправностей, а также контроля износа различных узлов компонентов авиационной технической системы.

В настоящее время контроль технического состояния двигателя проводится с помощью диагностики простых параметров его работы, а именно – оценивается общее время наработки двигателя в часах. Такой подход не учитывает фактические условия среды, что является его существенным недостатком. Внешняя среда способна влиять на износ компонентов и узлов двигателя, что приводит к усталостным повреждениям. Также не стоит забывать о том, что воздействие внешней среды может иметь агрессивный характер.

Конструкция авиационного двигателя и системы его управления постоянно модернизируются и усложняются, в связи с чем остро встает вопрос о разработке более надежной системы контроля их технического состояния. В данной работе предлагается применение более точных методов диагностики, а также создание перспективных систем контроля, учитывающих влияние внешних факторов на работу авиационной системы.

Определить неисправности и контролировать износ двигателя возможно методом диагностики уровня вибрации и наличия твердых частиц в масле. Благодаря этим методам полученная информация позволяет оценить надежность авиационного двигателя, а также предупредить экипаж о возможных неисправностях во время полета. Также стоит отметить, что, в зависимости от степени износа или повреждения, появляется возможность своевременной замены или ремонта компонентов и узлов авиационного двигателя, что существенно сокращает время, трудозатраты и стоимость обслуживания.

В системе контроля авиационного двигателя немаловажную роль играет система датчиков, собирающих информацию о рабочих технических характеристиках авиационного двигателя и его состоянии как во время полета, так и при наземных испытаниях. Датчики способны измерить такие параметры работы авиационной системы, как температура, давление газа, уровень вибрации, указывающий на износ компонентов двигателя, скорость вращения ротора, наличие твердых частиц в масле, расход топлива и воздуха и т. д. Регистрация измерений датчиков и их последующая обработка способны предотвратить чрезвычайную ситуацию на борту самолета. Также это возможно при работе системы контроля совместно с другими контрольно-измерительными устройствами, например, автоматической системой управления двигателем и системой противопожарной защиты.

Благодаря определению предельных значений вибраций возможно предотвратить поломку компонентов двигателя, например, выход из строя внешних узлов из-за усталостных нагру-

зок. Также чрезмерная вибрация может привести к ослаблению электрических и механических соединений, а в долгосрочной перспективе – к их преждевременному износу и последующему отказу. Для более точного определения влияния вибрационных нагрузок необходимо выявить причины их возникновения путем анализа рабочих характеристик работы двигателя. Это позволяет своевременно обнаружить наличие неисправности, которая в последующем может не только вызывать повышенный уровень вибрации, но и представлять риск для важных узлов, например, редукторов и опор роторов.

Разработке инновационных методов контроля способствует развитие авиационных систем в целом. Например, исследование возможности контроля наличия твердых частиц в газовом тракте двигателя из-за попадания посторонних предметов является важным направлением контроля технического состояния. Посторонние предметы, попадающие в двигатель, можно классифицировать по степени опасности: первая категория – не наносящие ущерба; вторая категория – вызывают повреждение узлов и отдельных компонентов авиационного двигателя; третья – вызывают уничтожение системы и полный выход ее из строя. Своевременная диагностика, анализ и расширение базы данных, включающей в себя случаи попадания в двигатель посторонних предметов, позволят существенно сократить число отказов авиационного двигателя по уже установленным причинам.

Интегрированная системы контроля технического состояния авиационного двигателя на базе многоканального контроля

Создание системы контроля технического состояния авиационного двигателя требует высокого уровня надежности системы и точности измерений. Также необходимо создать эксплуатационную технологичность с целью простоты обслуживания и возможности дальнейшего совершенствования и модернизации системы. Система измерения в комплексе с соответствующим программным обеспечением и базой данных представляет собой экспертную систему, способную определить состояние авиационного двигателя, информировать экипаж о возможной неисправности и выработать рекомендации по устранению. Основные цели создания интегрированной бортовой системы контроля двигателя – автоматизированная диагностика технического состояния авиационного двигателя и выдача рекомендаций для своевременных работ технического

обслуживания компонентов и узлов системы или силовой установки в целом.

В качестве интегрированной системы контроля технического состояния авиационного двигателя предлагается функциональная схема многоканального контроля [1]. Многоальтернативная система контроля показана на рис. 1, где в качестве измерительного устройства используется волоконно-оптическая брэгговская решетка (ВБР) [2], регистрирующая информацию о физическом состоянии двигателя, где ИУ – исполнительные устройства; x_k – входные переменные, где $k \in (1; m)$; ИзУ – измерительное устройство; y'_k – выходные переменные, которые объединяются в вектор выхода \vec{y}'_k .

Система, показанная на рис. 1, дополняется устройством расстановки приоритетов по тому или иному компоненту вектора выхода, что позволяет эффективнее контролировать техническое состояние двигателя во избежание чрезвычайных ситуаций [3].

В качестве системы датчиков предлагается применение ВБР. Использование такой конструкции датчиков позволяет регистрировать такие физические воздействия, как температура, растяжение, давление и вибрация. Волоконно-оптическая брэгговская решетка способна отражать определенную длину волны, зависящую от параметров решетки и изменяющуюся при приложении физического воздействия [4]. Работа такого рода датчиков основана на регистрации изменений отраженного сигнала от волоконно-оптической брэгговской решетки и последующей обработке данных [5].

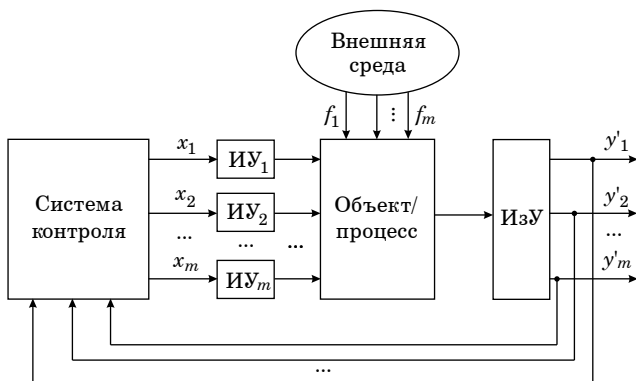
Датчики состоят из чувствительного элемента волоконно-оптической брэгговской решетки

и конструкции, которая передает механические колебания на чувствительный элемент. Данные устройства имеют ряд преимуществ [6]:

- помехоустойчивость;
- возможность использования в условиях высокой температуры и влажности;
- долговечность и надежность;
- малые габариты и легкая интеграция в системы мониторинга и контроля.

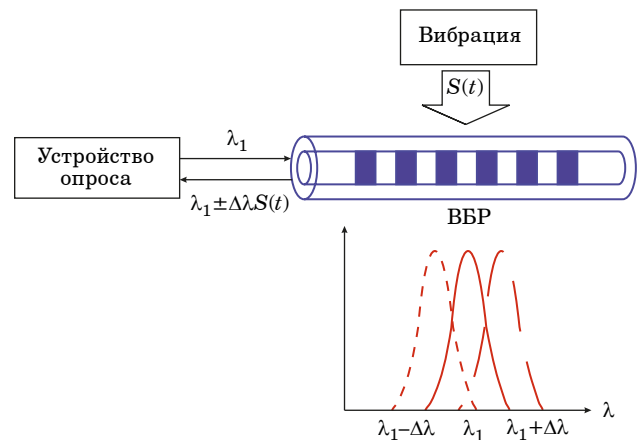
Волоконно-оптическая брэгговская решетка – это оптическое волокно, имеющее различный показатель преломления в продольном направлении (рис. 2). При распространении света в световоде возникают два типа мод – направляемые и излучательные. Излучательные моды оптического волокна распространяются вдоль световода, при этом не сохраняя свою форму и направление, и формируют непрерывную функцию. В то время как направляемые моды, сохраняющие форму и направление следования вдоль оптического волокна, соответствуют дискретному набору постоянных значений. Стоит отметить, что направляемые и излучательные моды распространяются независимо друг от друга при условии, что показатель преломления волоконно-оптической брэгговской решетки постоянен. Но если показатель преломления периодически меняется, достигается резонансное взаимодействие между модами, и в результате основная мода световода связывается с модой, распространяющейся в обратном направлении. Тогда появляется дискретная длина волны излучения, которая отражается от волоконно-оптической брэгговской решетки и распространяется по оптическому световоду:

$$\lambda_B = 2n_{эфф}\Lambda. \tag{1}$$



• Рис. 1. Функциональная схема многоальтернативной системы контроля износа авиационного двигателя. Пояснения даны в тексте

• Fig. 1. Functional scheme of the multi-alternative system of aviation engine wear control. Explanations are given in the text



• Рис. 2. Структурная схема датчика вибрации на основе волоконно-оптической брэгговской решетки

• Fig. 2. Structural diagram of vibration sensor based on fibre optic Bragg grating

Если условие Брэгга (1), описывающее прямую зависимость длины волны отражения и показателя преломления основной моды сердцевинны световода [7], не выполняется, отраженное излучение не будет находиться в фазе с несущей волной, и со временем излучение ослабнет. В ином случае, при выполнении условия Брэгга, отраженный свет складывается и распространяется по волокну в обратном направлении [5].

Система опроса датчиков на базе волоконно-оптической брэгговской решетки

Для опроса датчиков с волоконно-оптической брэгговской решеткой используются специальные устройств – интеррогаторы. Они могут быть оснащены перестраиваемым лазером и фотоприемником, суперлюминесцентным лазерным диодом и анализатором спектра [8]. Еще одним способом опроса является использование узкополосного лазера, падающего на склон волоконно-оптической брэгговской решетки и фотоприемника. Эти устройства позволяют определить изменение отраженного света и связать его с физическим воздействием на волоконно-оптическую брэгговскую решетку.

Рассмотрим первое используемое решение – это интеррогатор на основе перестраиваемого лазера и фотоприемника, являющийся инновационным устройством, используемым в оптических системах измерения и анализа оптических сигналов. Структурная схема данного устройства показана на рис. 3.

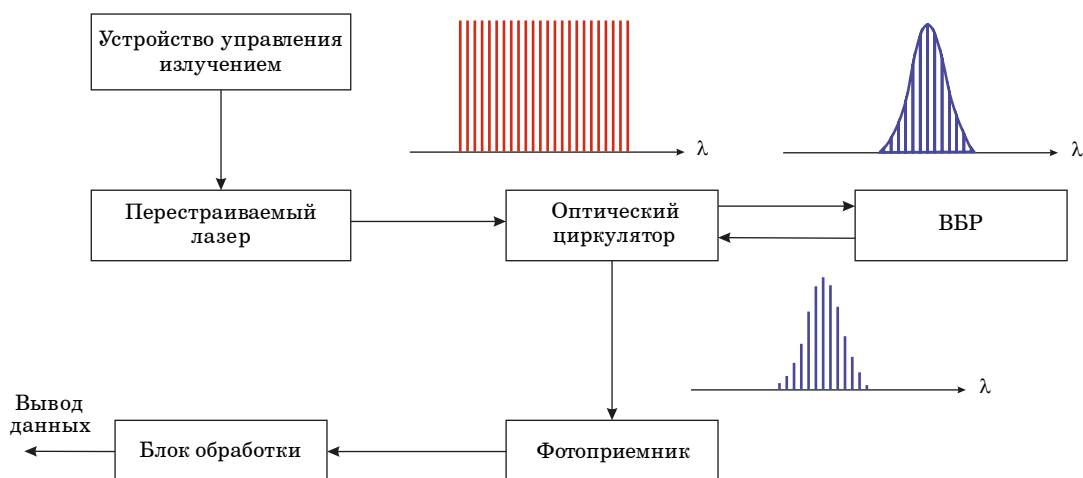
Основная задача интеррогатора заключается в определении точного значения длины вол-

ны сигнала, получаемого от перестраиваемого лазера, т. е. лазера, способного изменять свою рабочую длину волны в широком диапазоне. Фотоприемник, в свою очередь, служит регистратором и преобразователем оптического сигнала в электрический.

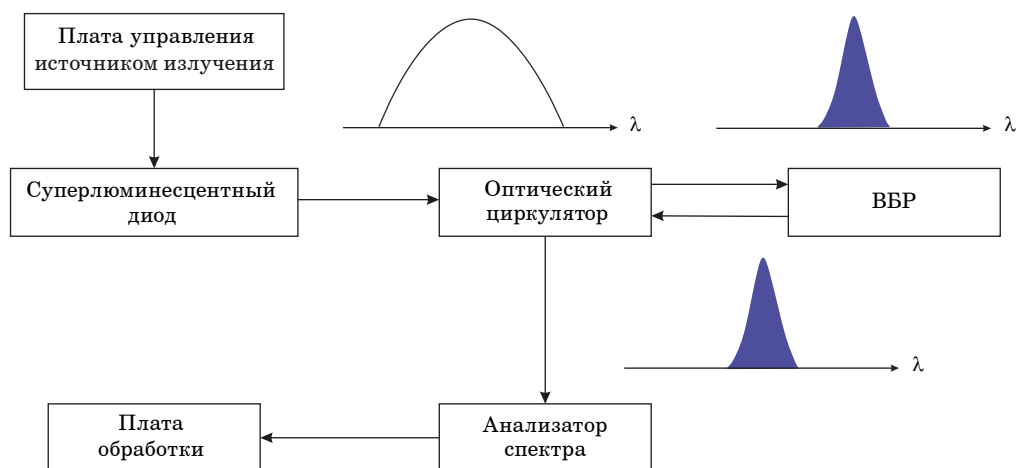
Процесс работы интеррогатора в качестве устройства опроса выглядит следующим образом: устройство управления излучением, управляя длиной волны лазера и мощностью излучения, сканирует датчики. В нашем случае это волоконно-оптическая брэгговская решетка. Далее каждая дискретная длина волны отражается от граней волоконно-оптической брэгговской решетки в соответствии с ее спектром и детектируется фотоприемником. После одного цикла сканирования блок обработки, накопив все дискретные значения, проводит аппроксимацию и определение центральной длины волны брэгговской решетки.

Преимуществами данного способа являются незначительная погрешность измерения, порядка 2 нм, широкий диапазон рабочих длин волн, высокая скорость обработки сигнала и возможность удаленного контроля и мониторинга. Данное устройство также представляет информацию о качестве и стабильности оптической системы, что позволяет быстро реагировать на любые отклонения и принимать соответствующие меры. Однако недостаток метода заключается в ограниченной частоте сканирования, от которой напрямую зависит диапазон контролируемых частот вибраций. К тому же устройство имеет высокую стоимость из-за наличия перестраиваемого оптического источника и устройства управления излучением.

Интеррогатор с применением суперлюминесцентного диода и анализатора спектра, структур-



• Рис. 3. Структурная схема интеррогатора на основе перестраиваемого лазера и фотоприемника
 • Fig. 3. Structural diagram of the interrogator based on a tunable laser and photodetector



• Рис. 4. Структурная схема интеррогатора на основе суперлюминесцентного диода и анализатора спектра
 • Fig. 4. Structural diagram of the interrogator based on a superluminescent diode and spectrum analyser

ная схема которого показана на рис. 4, не уступает в значениях разрешающей способности, рабочего диапазона длин волн, а также в быстродействии и точности измерений. Например, частота сканирования может составить значение 6 кГц, что позволяет детектировать частоту вибрации до 3 кГц. Однако стоит отметить, что существуют устройства, частота сканирования которых составляет до 35 кГц [9]. Интеррогатор также обеспечивает высокую стабильность и надежность измерений, что является важным для систем контроля многих процессов, где точность имеет решающее значение. Такие устройства не сильно отличаются по стоимости от описанных ранее, однако они имеют большие габариты в связи с тем, что большую часть прибора составляет анализатор спектра. В качестве чувствительного элемента анализатора спектра используется ПЗС-линейка, и типовая погрешность данных устройства составляет 5 пм.

Заключение

Внедрение встроенных систем контроля технического состояния в авиационной технике имеет важное значение для обеспечения высокой надежности, возможности ремонта и обслуживания, а также удобства эксплуатации. Эти системы предоставляют возможность проводить диа-

гностику состояния самолета, силовой установки и бортовых систем, что способствует улучшению безопасности полетов и снижению затрат на обслуживание. Однако для достижения еще более точных результатов и перехода на техническое обслуживание по состоянию необходимо разработать перспективные системы контроля технического состояния, которые будут использовать более точные методы диагностики износа. Это позволит предупредить возможные поломки и проблемы на более ранних стадиях, что, в свою очередь, сократит время и затраты на ремонт, а также улучшит планирование технического обслуживания.

Перспективные системы контроля технического состояния должны быть разработаны с учетом перехода на техническое обслуживание по состоянию и использования более точных методов диагностики износа. Это позволит оптимизировать объем необходимых работ, увеличить надежность двигателей и снизить затраты на техническое обслуживание. Таким образом, интегрированные системы контроля играют важную роль в обеспечении надежности и эксплуатационной эффективности авиационной техники. Дальнейшее развитие и совершенствование таких систем будут способствовать повышению безопасности и снижению затрат на техническое обслуживание, что является важными факторами для авиационной отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент 86734 РФ, МПК8 G 01 J 3/26. Параллельный анализатор спектра сигналов оптического диапазона / И. Н. Архипов, М. А. Ваганов, С. В. Кулаков, О. Д. Москалец, Л. Н. Пресленев, В. Н. Прокашев (РФ). № 2009116195/22 // Изобретения и полезные модели. 2009. № 25. 2 с.

2. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука. 1978. 392 с.
3. Мирошник И. В. Теория автоматического управления. Линейные системы. СПб.: Питер, 2005. 336 с.
4. Спектральные методы анализа: практическое руководство: учеб. пособие / В. И. Васильева [и др.]. СПб.: Лань, 2014. 416 с.
5. Fiber Bragg grating and long period grating sensor for simultaneous measurement and discrimination of strain and temperature effects / K. Srimannarayana [et al.] // Optica applicata. 2008. № 38. P. 601–608.
6. A robust and compact fiber bragg grating vibration sensor for seis-micmeasurement / Y. Weng [et al.] // IEEE sensors journal. 2012;12(4):800–804.
7. Kashyap R. Fiber Bragg gratings. San-Diego: Academic press, 1999. 480 p.
8. Лебедева В. В. Техника оптической спектроскопии. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Москов. ун-та, 1992. 352 с.
9. Pernille. I-MON high speed. URL: <https://ibsen.com/products/interrogation-monitors/i-mon-high-speed/> (дата обращения: 12.09.2023).

REFERENCES

1. Patent 86734 RF, MPK8 G 01 J 3/26. Parallel spectrum analyser of optical range signals; I. N. Arkhipov, M. A. Vaganov, S. V. Kulakov, O. D. Moskalets, L. N. Preslenev, V. N. Prokashev (Russian Federation). No. 2009116195/22 // Inventions and useful models. 2009;(25):2. (In Russ.).
2. Zaidel A. N., Ostrovskaya G. V., Ostrovskiy Yu. I. Technique and practice of spectroscopy. Moscow: Nauka; 1978. 392 p. (In Russ.).
3. Miroshnik I. V. Theory of automatic control. Linear systems. SPb.: Piter; 2005. 336 p. (In Russ.).
4. Vasilieva V. I., Stoyanova O. F., Shkutina I. V., Karpov S. I., Selemenov V. F., Semenov V. N. Spectral methods of analysis: practical guide: textbook. SPb.: Lan; 2014. 416 p. (In Russ.).
5. Srimannarayana K. et al. Fiber Bragg grating and long period grating sensor for simultaneous measurement and discrimination of strain and temperature effects. Optica applicata. 2008;(38):601–608.
6. Weng Y. et al. A robust and compact fibre bragg grating vibration sensor for seis-micmeasurement. IEEE sensors journal. 2012;12(4):800–804.
7. Kashyap R. Fiber Bragg gratings. San-Diego: Academic press; 1999. 480 p.
8. Lebedeva V. V. Technique of optical spectroscopy. 2nd ed., rev. and supplement. Moscow: Moscow Institute Publ.; 1992. 352 p. (In Rus.).
9. Pernille. I-MON high speed. Available from: <https://ibsen.com/products/interrogation-monitors/i-mon-high-speed/> [Accessed 12 September 2023].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Сердюк Ксения Владимировна, аспирант, старший преподаватель кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – спектральный анализ, автоматическое управление и контроль, дифракционные спектральные приборы.

Поступила в редакцию 27.11.2023

Поступила после рецензирования 02.12.2023

Принята к публикации 29.01.2024

Serdiuk Kseniia V., Postgraduate Student, Senior Lecturer at the Department of Electronic and Laser Design and Technology, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – spectral analysis, automatic control and monitoring, diffraction spectral instruments.

Received 27.11.2023

Revised 02.12.2023

Accepted 29.01.2024

Научная статья
УДК 543.421/.424

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-42-50

Применение волоконной оптики в спектроскопических системах контроля физических и технологических процессов

Василий Иванович Казаков¹

vasilykazakov@mail.ru, orcid.org/0009-0006-1442-7429, SPIN-код: 6933-2170

Вениамин Вадимович Китаев¹

ven.kit@yandex.ru, orcid.org/0009-0000-6265-1931, SPIN-код: 6841-9288

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена исследованию особенностей применения волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) анализируемых сигналов в системах дистанционной оптической спектроскопии. Целью исследования являлась разработка математических моделей и методик расчета искажений и энергетических потерь, возникающих при передаче оптических сигналов по волокну, линзовому блоку ввода излучения и системе согласования ВОСП с входной апертурой спектрального прибора. Проведено исследование искажений аппаратной функции спектрального прибора при применении оптического волокна для оптического спектрального прибора с дифракционной решеткой. На основе выполненного компьютерного моделирования получена оценка уширения аппаратной функции спектрального прибора с дифракционной решеткой при использовании одномодового и многомодового оптических волокон. Исследованы энергетические потери оптического излучения в системе согласования ВОСП с входной апертурой спектрального прибора: предложена математическая модель и на ее основе рассчитаны величины энергетических потерь. Предложенная математическая модель позволяет при заданных входных параметрах спектрального прибора осуществлять расчеты параметров оптических элементов для минимизации энергетических потерь. Разработанные методики расчета, предложенные математические модели и результаты компьютерного моделирования могут быть применены и использованы при разработке и расчете систем дистанционной оптической спектроскопии для контроля физических, физико-химических и технологических процессов.

Ключевые слова: оптика, спектроскопия, оптическое волокно, аппаратная функция спектрального прибора, системы контроля, дифракционная решетка, энергетические потери

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Для цитирования: Казаков В. И., Китаев В. В. Применение волоконной оптики в спектроскопических системах контроля физических и технологических процессов // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 1. С. 42–50. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-42-50.

Original article

Application of fibre optics in spectroscopic systems of control of physical and technological processes

Vasily I. Kazakov¹

vasilykazakov@mail.ru, orcid.org/0009-0006-1442-7429, SPIN-code: 6933-2170

Veniamin V. Kitaev¹

ven.kit@yandex.ru, orcid.org/0009-0000-6265-1931, SPIN-code: 6841-9288

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The work is devoted to the study of the peculiarities of application of fibre-optic transmission system (FOTS) of analysed signals in remote optical spectroscopy systems. The aim of the study was to develop mathematical models and methods of calculation of distortions and energy losses arising during the transmission of optical signals through a fibre, a lenticular radiation input unit and a system for matching the VOSP with the input aperture of a spectral instrument. The study of distortions of the hardware function of the spectral instrument when using optical fibre for an optical spectral instrument with a diffraction grating has been carried out. On the basis of the performed computer modelling the estimation of the broadening of the hardware function of the spectral device with a diffraction grating when using single-mode and multimode optical fibres has been obtained. The energy losses of optical radiation in the system of matching of FOSS with the input aperture of a spectral device are investigated: a mathematical model is proposed and the values of energy losses are calculated on its basis. The proposed mathematical model allows, given the input parameters of the spectral device, to calculate the parameters of optical elements to minimise the energy losses. The developed calculation methods, proposed mathematical models and results of computer modelling can be applied and used in the development and calculation of remote optical spectroscopy systems for control of physical, physical-chemical and technological processes.

Keywords: optics, spectroscopy, optical fibre, spectral instrument hardware function, control systems, diffraction grating, energy losses

Acknowledgements. This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement no. FSRF-2023-0003 "Fundamental bases for construction of jam-proof systems for space and satellite communications, relative navigation, technical vision and aerospace monitoring".

For citation: Kazakov V. I., Kitaev V. V. Application of fibre optics in spectroscopic systems of control of physical and technological processes. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(1):42–50. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-42-50.

Введение

Методы оптической спектроскопии находят широкое применение в самых различных областях физики, науки и техники [1, 2]. Одной из наиболее важных областей применения является использование спектроскопических методов и аппаратуры в задачах контроля физических, физико-химических и технологических процессов [3–6]. Это обусловлено тем, что оптическое излучение несет в себе зачастую исчерпывающее количество информации о состоянии контролируемого процесса. Также достоинствами спектроскопических методов в задачах контроля являются высокое быстродействие и скорость проведения процедуры контроля. Время получения результата определяется, по сути, быстродействием регистрирующего фотоприемного устройства и временем интегрирования (накопления), которое обычно составляет несколько десятков микросекунд.

Вместе с тем следует отметить, что протекание физических, физико-химических и технологических процессов часто происходит в экстремальных и неблагоприятных для работы спектрального прибора условиях. Речь идет о высокой температуре, влажности, воздействии агрессивной химической среды, механических вибрациях и т. п. Для решения задач контроля таких процессов широкое применение получил метод дистанционной оптической спектроскопии. Этот метод позволяет удалить спектральный прибор на определенное расстояние с целью минимизации негативных воздействий, а анализируемое излучение от контролируемого процесса передать с помощью оптической системы с применением оптического волокна. В этом случае воздействие агрессивных условий приходится только на элементы входной оптической системы – входную линзу и торец оптического волокна, которые должны быть устойчивы к таким воздействиям.

При использовании оптоволокон в качестве линии передачи возникают искажения и энергетические потери оптического сигнала, что необходимо учитывать при разработке систем спектроскопического контроля и диагностики. В данной работе предложена методика оценки энергетических потерь и влияния искажений оптического сигнала на результат спектрального анализа.

Влияние волоконно-оптической системы передачи на искажение аппаратной функции дифракционного спектрального прибора

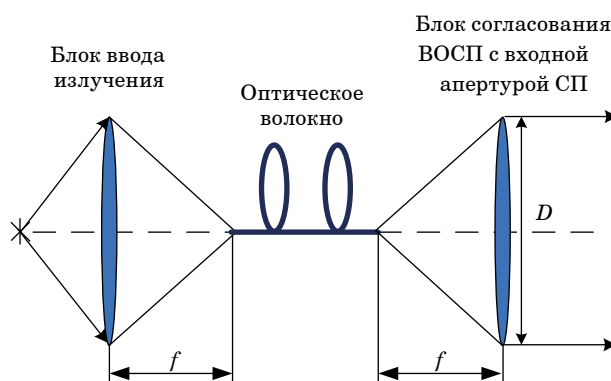
При разработке систем контроля, построенных на базе оптических спектрометров, очень важно уделять внимание вопросам, связанным с анализом эффективности работы системы доставки излучения от объекта контроля до входной апертуры спектрометра.

Анализу влияния различных факторов на эффективность передачи анализируемых оптических сигналов по волокну посвящены работы [7–10]. На рис. 1 показана оптическая схема волоконно-оптической системы передачи (ВОСП), где ИИ – контролируемый источник оптического излучения, ОВ – оптоволокно.

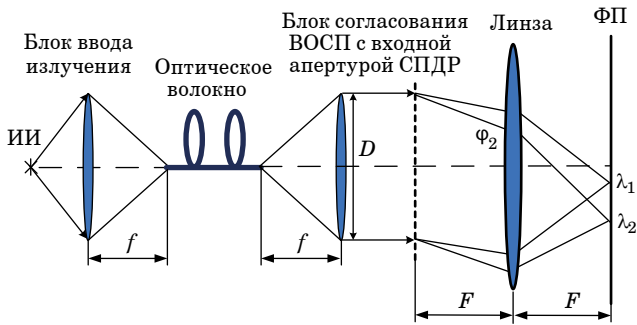
ВОСП включает в себя три ключевых элемента: линзовый блок ввода излучения, далее непосредственно оптическое волокно (ОВ) и линзовый блок согласования с входной апертурой спектрального прибора.

На рис. 2 показана оптическая схема системы контроля на базе спектрометра с дифракционной решеткой и ВОСП (ИИ – источник излучения (контролируемый процесс), ДР – дифракционная решетка, ФП – фотоприемники).

Применение ВОСП приводит к искажениям волнового фронта анализируемого излучения от требуемого однородного и плоского, что вызывает погрешности спектроскопического анализа.



- Рис. 1. Оптическая схема ВОСП
- Fig. 1. Optical scheme of the fibre optic transmission system



• *Рис. 2. Система контроля на базе спектрометра с дифракционной решеткой и ВОСП*
 • *Fig. 2. Control system based on a spectrometer with a diffraction grating and fibre optic transmission system*

Оценку возникающих погрешностей предлагается производить через анализ уширения аппаратной функции системы контроля.

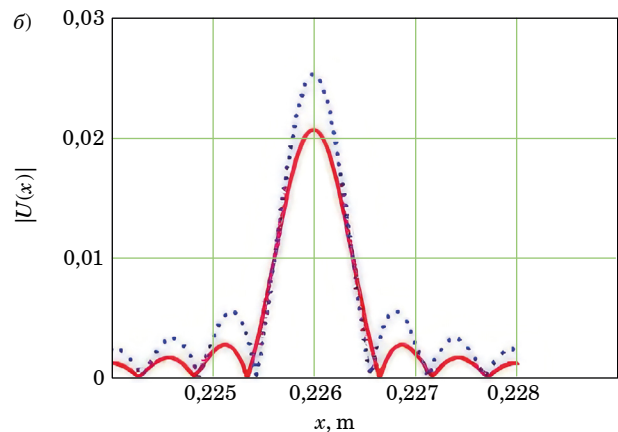
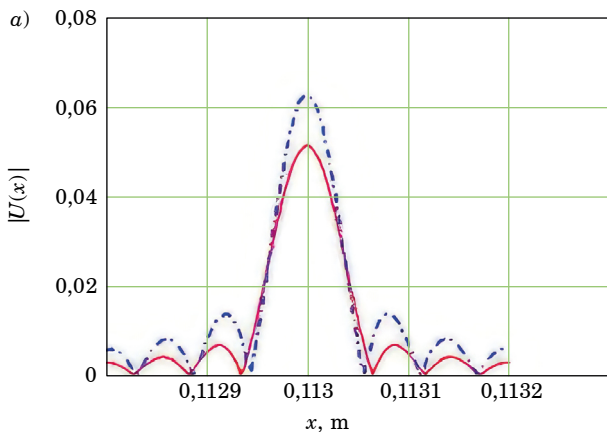
Для одномодового волокна оптическое поле на торце можно адекватно описать гауссовым распределением [11]:

$$U(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\zeta^2}{(d/2)^2}\right), \quad (1)$$

где d – диаметр сердцевины оптоволокна.

Оптическую схему блока согласования ВОСП с входной апертурой спектрального прибора можно представить как оптический когерентный Фурье-процессор, поэтому после его прохождения поле $U(\xi)$ будет являться результатом пространственного преобразования Фурье:

$$U(\xi) = \frac{1}{\sqrt{\lambda f_1}} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} u(\zeta) \exp\left(-\frac{ik\zeta\xi}{\lambda f_1}\right) d\zeta. \quad (2)$$



• *Рис. 3. Аппаратная функция спектрометра с дифракционной решеткой: а – +1 дифракционный порядок; б – +2 дифракционный порядок*
 • *Fig. 3. Energy spread function of the diffraction grating spectrometer: а – +1 diffraction order; б – +2 diffraction order*

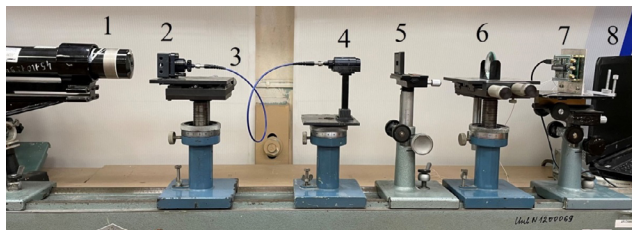
Дальнейшее оптическое преобразование оптического излучения детально рассмотрено в работе [12]. Здесь отметим лишь, что результат такого преобразования можно представить в форме Фурье-преобразования результата перемножения функции пропускания дифракционной решетки $T(\xi)$ и искаженного поля $U(\xi)$:

$$U(x) = \hat{F}[T(x) \times U(x)]. \quad (3)$$

Следует отметить, что предложенная модель спектрального преобразования, реализованного в дифракционном спектрометре с дифракционной решеткой, позволяет производить оценку уширения аппаратной функции для каждого дифракционного порядка отдельно. Для этого достаточно взять соответствующий интересующему дифракционному порядку коэффициент разложения в ряд Фурье функции пропускания дифракционной решетки $T(\xi)$ [12]. На основании предложенного подхода выполнено компьютерное моделирование аппаратной функции для +1 и +2 дифракционных порядков. Результаты этого моделирования приведены на рис. 3, а, б соответственно. Штрихпунктирной линией показана аппаратная функция (без применения ВОСП), сплошной линией – в случае использования одномодового волокна и вызванных им энергетических потерь, пространственных искажений волнового фронта.

Моделирование выполнено для дифракционной решетки апертурой $L = 1$ см и периодом $T_g = 5$ мкм, длины волны излучения $\lambda = 632$ нм и фокусного расстояния линзы $F = 50$ см. Результаты моделирования показали, что применение одномодового волокна приводит к уширению аппаратной функции, по меньшей мере, на 20 %.

Для подтверждения полученных результатов компьютерного моделирования были проведены экспериментальные исследования по оценке искажений аппаратной функции при применении



• Рис. 4. Стенд для оценки влияния ВОСП на аппаратную функцию спектрального прибора. Пояснения даны в тексте

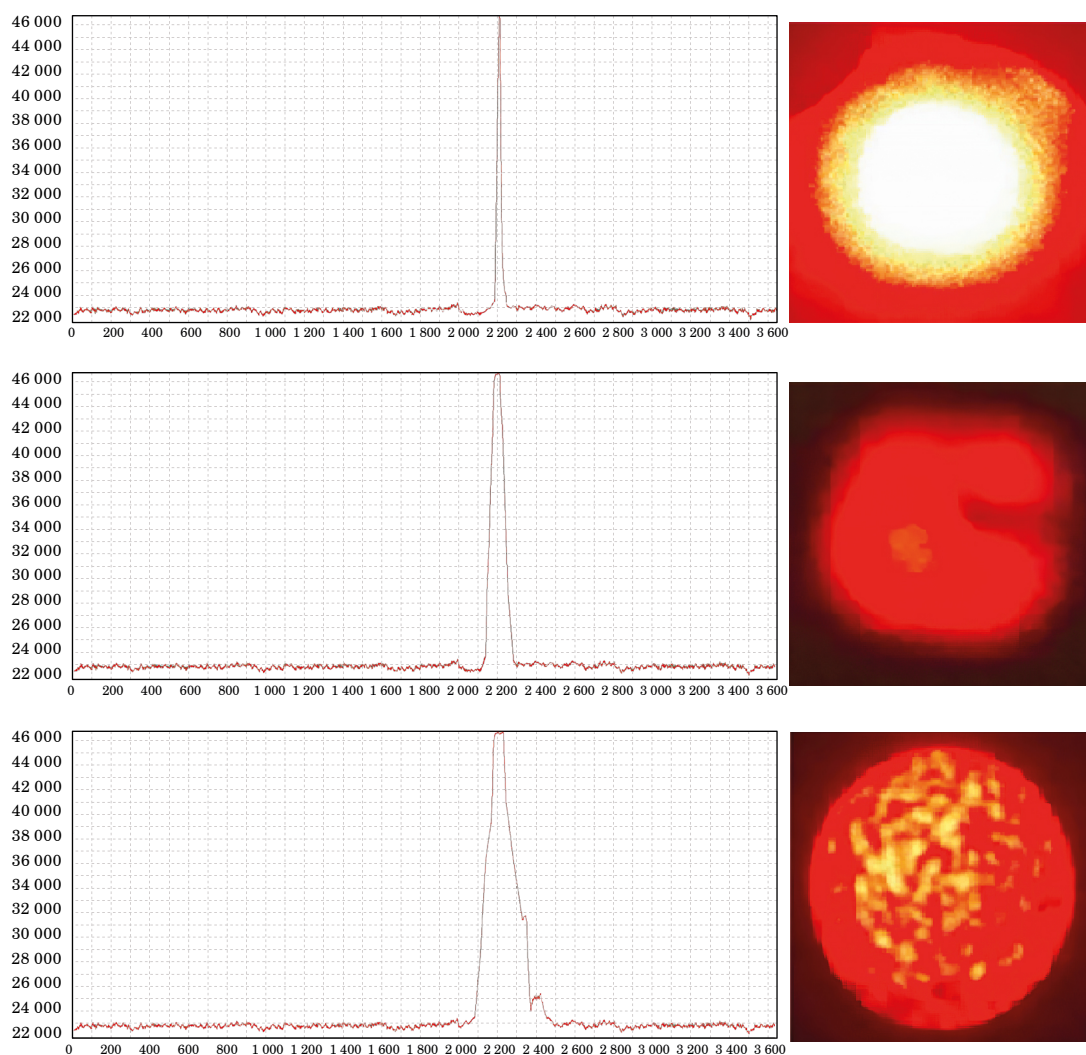
• Fig. 4. Bench for evaluating the effect of fibre optic transmission system on the hardware function of the spectral device. Explanations are given in the text

ВОСП. Фотография экспериментального стенда для оценки влияния ВОСП приведена на рис. 4.

На рис. 4 показаны следующие функциональные узлы стенда: 1 – He-Ne-лазер, $\lambda=632$ нм; 2 – система ввода излучения в ОВ; 3 – ОВ; 4 – блок согласования ВОСП с апертурой спектрального прибора; 5 – пропускающая дифракционная решетка; 6 – линза с фокусным расстоянием 25 см; 7 – ПЗС-линейка с электронным блоком обработки; 8 – компьютер для регистрации формы аппаратной функции.

Экспериментальные исследования включали в себя три этапа:

- 1) оценка формы аппаратной функции дифракционного спектрального прибора без ВОСП;
- 2) оценка формы аппаратной функции дифракционного спектрального прибора с применением одномодового волокна PM-S405-XP;



• Рис. 5. Результаты оценки уширения аппаратной функции спектрального прибора при применении различных типов оптических волокон

• Fig. 5. Results of the estimation of the broadening of the energy spread function of the spectral device when applying different types of optical fibers

3) оценка формы аппаратной функции дифракционного спектрального прибора с применением многомодового волокна PM-S405-XP Nuferrn-FUD-3759.

На рис. 5 показаны также фотографии сформированного оптического поля, подаваемого на входную апертуру спектрального прибора. Отчетливо видно, что применение одномодового волокна приводит к пространственным искажениям распределения интенсивности, а в случае многомодового волокна возникает так называемая спекл-картина – пятнистая, динамически меняющаяся при механическом воздействии на волокно структура. Экспериментальные результаты показали уширение аппаратной функции прибора на 30 % в случае применения одномодового волокна и более чем на 70 % – при применении многомодового волокна.

Нельзя также не отметить значительное увеличение энергетических потерь для системы с одномодовым волокном вследствие меньшего диаметра сердцевины волокна по сравнению с многомодовым.

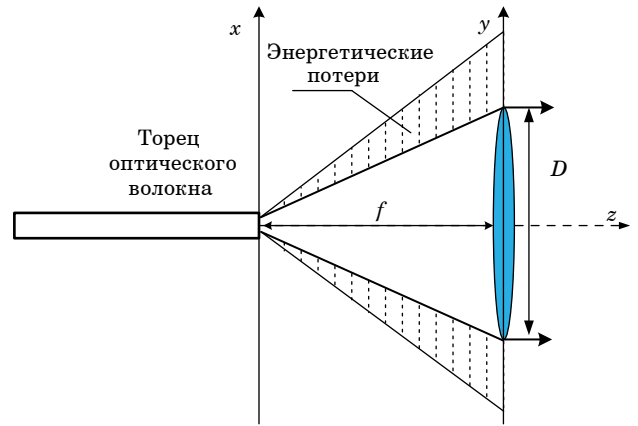
Оценка погрешностей, возникающих вследствие ограниченности апертур оптических линз

Конечные размеры апертур линз приводят к возникновению дополнительных энергетических потерь. Особенно это проявляется в системе согласования ВОСП с входной апертурой спектрального прибора. Для оценки погрешностей, возникающих из-за конечной апертуры линз, предлагается рассмотреть следующую простую оптическую схему, показанную на рис. 6 [17].

Рассогласование числовой апертуры волокна и размера линзы приводит к тому, что часть излучения распространяется вне пределов линзы, что, соответственно, приводит к энергетическим потерям. В качестве критерия, позволяющего оценить уровень этих потерь, предлагается использовать ту долю излучения, которая распространяется за пределами линзовой системы

Чтобы численно оценить эту долю, предлагается следующая математическая модель. Как было показано выше, поле на торце волокна можно описать в форме гауссова распределения (выражение (5)). Далее предлагается рассмотреть процесс трансформации этого поля по мере распространения через слои свободного пространства и линзы.

Преобразование поля, вызванного распространением в слое свободного пространства протяженностью z , можно описать дифракцией Френеля [12]. Таким образом, в плоскости лин-



• Рис. 6. Возникновение энергетических потерь в системе согласования ВОСП со входной апертурой спектрального прибора

• Fig. 6. Occurrence of energy losses in the system of matching of fibre optic transmission system with the input aperture of the spectral device

зы будет сформировано поле $U(y)$, которое можно представить в форме:

$$U(y) = \sqrt{\frac{e^{ikz}}{i\lambda z}} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} u(x) \exp(i \frac{k}{2z} (x - y)^2) dx, \quad (4)$$

где λ – длина волны; z – протяженность слоя свободного пространства; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число.

Следует также учитывать, что размер апертуры линзы D , протяженность слоя свободного пространства z должны быть согласованы с числовой апертурой волокна и дифракционной расходимостью оптического пучка, которая определяется диаметром сердцевины волокна d .

На основании предложенной модели величина энергетических потерь может быть оценена в форме:

$$\Delta = 1 - \frac{\left(\int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} I(y) dy \right)}{\left(\int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} I_0(x) dx \right)}, \quad (5)$$

где $I_0(x) = |u(x)|^2$, $I(y) = |U(y)|^2$ – распределение поля на осях x и y соответственно; D – размер апертуры линзы.

Распределение интенсивности поля $I(y)$ можно записать в форме:

$$I(y) = \frac{I_0}{2} \left[(C(\xi_2) - C(\xi_1))^2 + (S(\xi_2) - S(\xi_1))^2 \right], \quad (6)$$

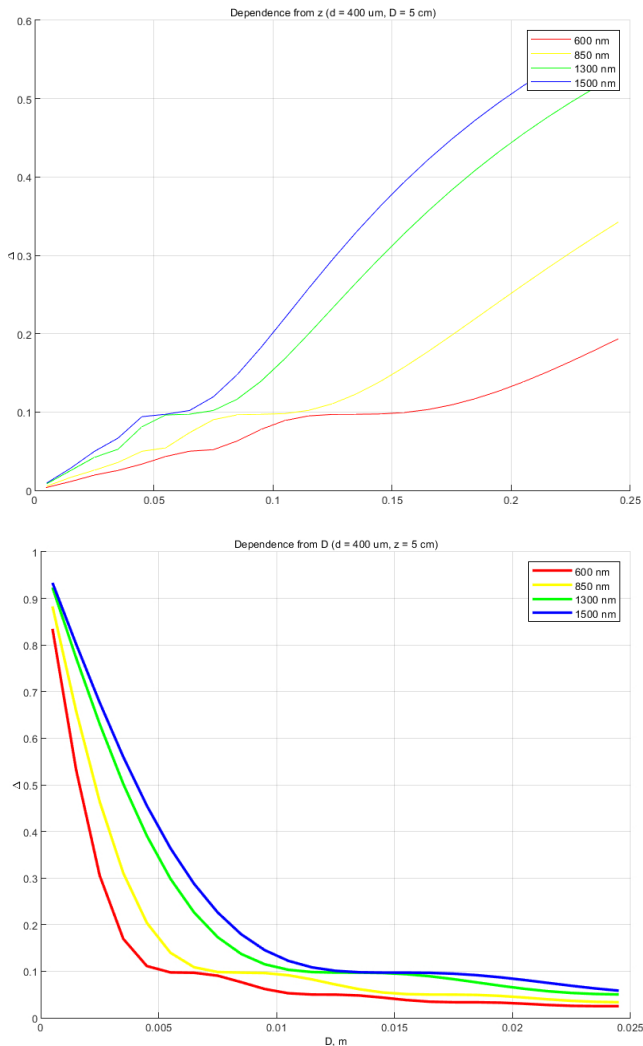
где $C(\xi) = \int_0^\xi \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt$, $S(\xi) = \int_0^\xi \sin\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt$ –

интегралы Френеля; $\xi_1(x) = -\sqrt{\frac{k}{\pi z}}\left(\frac{d}{2} + x\right)$,

$\xi_2(x) = \sqrt{\frac{k}{\pi z}}\left(\frac{d}{2} - x\right)$ – переменные интегрирования.

Соотношения (5) и (6) позволяют провести компьютерное моделирование оценки величины энергетических потерь для основных параметров оптической системы согласования ВОСП с входной апертурой спектрального прибора: длины волны излучения, диаметра сердцевины волокна, расстояния от торца волокна до линзы, размера апертуры линзы.

На рис. 7 приведены результаты моделирования оценки энергетических потерь в пакете



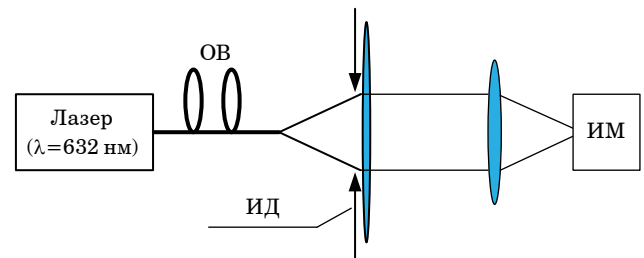
• Рис. 7. Результаты компьютерного моделирования оценки энергетических потерь
 • Fig. 7. Results of computer modelling of energy loss estimation

прикладных программ MatLab. Моделирование выполнено для четырех длин волн в диапазоне 400...1500 нм для оптического волокна с диаметром сердцевины $d = 400$ мкм с итерационным изменением всех остальных параметров оптической системы – z, D .

Представленные результаты компьютерного моделирования могут быть использованы при разработке ВОСП для спектроскопических систем контроля исходя из конкретных входных параметров – размера входной апертуры спектрального прибора, рабочего диапазона длин волн, конкретного типа и параметров используемого оптического волокна. Все это позволит подобрать оптимальные параметры оптических элементов для минимизации величины энергетических потерь.

Для подтверждения корректности предложенной методики оценки величины энергетических потерь был разработан лабораторный стенд для экспериментального измерения потерь. Оптическая схема стенда приведена на рис. 8 (ОВ – оптическое волокно, ИД – ирисовая диафрагма, ИМ – измеритель оптической мощности).

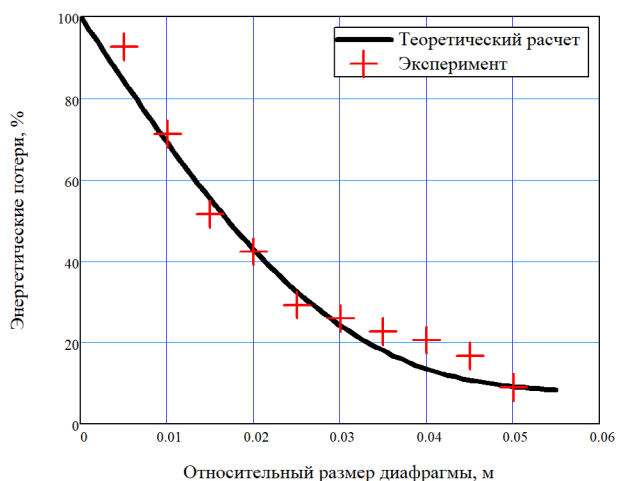
На рис. 9 приведена фотография лабораторного стенда, где 1 – лазерный источник; 2 – линзовая система ввода излучения в оптоволокно; 3 – ПОВ-волокно; 4 – закрепленный торец оптоволокна; 5 – ирисовая диафрагма с линзой; 6 – линзовая система согласования с измерителем оптической мощности.



• Рис. 8. Оптическая схема лабораторного стенда для оценки энергетических потерь в ВОСП
 • Fig. 8. Optical scheme of the laboratory bench for estimation of energy losses in fibre optic transmission system



• Рис. 9. Фотография лабораторного стенда. Пояснения даны в тексте
 • Fig. 9. Photo of the laboratory bench. Explanations are given in the text



• Рис. 10. Результаты лабораторного эксперимента и компьютерного моделирования
 • Fig. 10. Results of laboratory experiment and computer modelling

Изменение размера апертуры линзы выполнялось путем изменения относительного размера ирисовой диафрагмы. Остальные параметры лабораторного стенда: фокусное расстояние линзы $f = 94$ мм, длина волны лазерного источника $\lambda = 632$ нм.

Методика измерения величины энергетических потерь заключалась в следующем:

1) фиксация уровня мощности излучения при максимально открытой ирисовой диафрагме. Этот уровень мощности был взят за опорный и составил $P_{\max} = -31,4$ дБм;

2) изменение размера ирисовой диафрагмы с шагом 5 мм с последующим измерением уровня регистрируемой оптической мощности.

По результатам выполненных лабораторных исследований была построен график, отражающий соответствие результатов компьютерного моделирования и эксперимента (рис. 10).

Максимальное отклонение экспериментальных результатов от теоретических расчетов наблюдалось при диаметре относительного отверстия апертурной диафрагмы 0,04 м и составило

20 %. Можно утверждать, что корректность предложенной методики была подтверждена экспериментально, поэтому данную методику можно применять при проектировании более сложных волоконных систем для спектроскопической аппаратуры контроля различных процессов, протекающих в экстремальных условиях (повышенная температура и влажность, агрессивная химическая среда и т. п.), например, для контроля процессов горения, крашения текстильных материалов и др.

Заключение

Для перемещения оптического спектрального прибора на безопасное расстояние от контролируемого процесса предложено использование ВОСП, что позволяет исключить влияние агрессивных условий протекания контролируемого процесса на результат спектроскопического контроля.

Представленные в работе материалы отражают результаты оценки влияния передачи анализируемого излучения от объекта контроля до прибора на результат анализа оптического спектра. Показано, что передача по оптическому волокну приводит как к энергетическим потерям, так и пространственным искажениям анализируемого сигнала. В работе предложены математические модели, позволяющие рассчитывать параметры оптических элементов ВОСП для минимизации энергетических потерь. Кроме того, предложена математическая модель, позволяющая оценить уширение аппаратной функции спектрального прибора при использовании ВОСП. Полученные результаты теоретических исследований, компьютерного моделирования и экспериментов могут быть применены при разработке оптических систем контроля различных процессов, например, выплавки тугоплавких металлов, в текстильной промышленности при крашении материалов, при оптимизации процессов горения и др.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Параскун А. С. Измерительные сигналы и их обработка в спектроскопической системе контроля работы ракетного двигателя // Датчики и системы. 2022. № 5. С. 33–37.
2. Исследование оптических свойств авиационных гидравлических жидкостей методом оптической спектроскопии / Г. А. Костин [и др.] // Известия Тульского гос. ун-та. Техн. науки. 2022. № 8. С. 80–85.
3. Москалец О. Д., Сердюк К. В. Спектральные измерения оптическими дифракционными спектральными приборами: системный подход // Датчики и системы. 2022. № 5. С. 19–24.
4. Пожар В. Э., Мачихин А. С. Спектрально-поляризационные системы трехмерного технического зрения на основе акустооптической фильтрации // Светотехника. 2022. № 5. С. 32–35.

5. A review of remote laser-induced breakdown spectroscopy / W. L. [et al.] // *Applied spectroscopy reviews*. 2020. Vol. 55, № 1. P. 1–25.
6. Лебедев В. Ф., Булыга Д. В., Колядин А. В. Анализ примесного состава синтетических HPHT-алмазов методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии в условиях лазерно-индуцированной модификации поверхности // *Письма в Журнал техн. физики*. 2020. Т. 46, № 9. С. 7–9.
7. Reading, processing and correction of spectroscopic information in a diffraction grating spectral device / L. N. Preslenev, V. I. Kazakov, A. S. Paraskun, M. A. Vaganov // *Proc. of IEEE Xplore. 2018 Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF)*. SPb., 2018. P. 1–5. Doi: 10.1109/WECONF.2018.8604412.
8. Москалец О. Д., Курылева А. С., Параскун А. С. Волоконно-оптические устройства в составе систем спектроскопии, основанных на бесконтактном методе // *Датчики и системы*. 2020. № 7 (249). С. 17–22.
9. Kazakov V. I., Vaganov M. A. Diffraction losses investigation in a fiber-optic transmission line of analyzed signals for combustion processes automatic control systems // *Informatics and cybernetics in intelligent systems*. Springer International Publishing, 2021. P. 554–560. Doi: 10.1007/978-3-030-77448-6_54.
10. Ваганов М. А., Кулаков С. В., Прохоров А. В. Влияние температуры окружающей среды на передачу анализируемого сигнала по оптическому волокну // *Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: XXIV Междунар. науч. конф.: сб. ст. СПб.: ГУАП, 2021. С. 41–46.*
11. *Оптические устройства в радиотехнике. 2-е изд., испр. и доп. / под ред. В. Н. Ушакова. М.: Радиотехника, 2009. 264 с.*
12. Папулис А. *Теория систем и преобразований в оптике / пер. с англ. М.: Мир, 1971. 495 с.*

REFERENCES

1. Paraskun A. S. Measuring signals and their processing in the spectroscopic system of rocket engine operation control. *Sensors and systems*. 2022;(5):33–37. (In Russ.).
2. Kostin G. A., Chernyak T. A., Mayorov E. E., Kurlov V. V., Tayurskaya I. S. Investigation of optical properties of aviation hydraulic fluids by optical spectroscopy. *Investigation of optical properties of aviation hydraulic fluids by optical spectroscopy. Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2022;(8):80–85. (In Russ.).
3. Moskalets O. D., Serdyuk K. V. Spectral measurements by optical diffraction spectral devices: system approach. *Sensors and systems*. 2022;(5):19–24. (In Russ.).
4. Pozhar V. E., Machikhin A. C. Spectral-polarisation systems of three-dimensional technical vision on the basis of acousto-optical filtration. *Lighting engineering*. 2022;(5):32–35. (In Russ.).
5. Li W., Li X., Hao Z., Lu Y., Zeng X. A review of remote laser-induced breakdown spectroscopy. *Applied spectroscopy reviews*. 2020;55(1):1–25.
6. Lebedev V. F., Bulyga D. V., Kolyadin A. V. Analysis of the impurity composition of synthetic HPHT-diamonds by laser-spark emission spectroscopy under conditions of laser-induced surface modification. *Letters to the Journal of technical physics*. 2020;46(9):7–9. (In Russ.).
7. Preslenev L. N., Kazakov V. I., Paraskun A. S., Vaganov M. A. Reading, processing and correction of spectroscopic information in a diffraction grating spectral device. *Proc. of IEEE Xplore. 2018 Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF)*. SPb.; 2018, pp. 1–5. Doi: 10.1109/WECONF.2018.8604412. (In Russ.).
8. Moskalets O. D., Kuryleva A. S., Paraskun A. C. Fibre-optic devices as part of spectroscopy systems based on non-contact method. *Sensors and systems*. 2020;(7(249)):17–22. (In Russ.).
9. Kazakov V. I., Vaganov M. A. Diffraction losses investigation in a fibre-optic transmission line of analysed signals for combustion processes automatic control systems. *Informatics and cybernetics in intelligent systems*. Springer International Publishing; 2021, pp. 554–560. (In Russ.). Doi: 10.1007/978-3-030-77448-6_54.
10. Vaganov M. A. Kulakov S. V., Prokhorov A. B. Influence of ambient temperature on the transmission of the analysed signal along an optical fibre. *Wave electronics and infocommunication systems: XXIV International scientific conference: collection of articles: SPb.: SUAI; 2021, pp. 41–46. (In Russ.).*
11. Ushakov V. N. *Optical devices in radio engineering. 2nd edition, revised and additional. Moscow: Radiotekhnika; 2009. 264 p. (In Russ.).*
12. Papoulis A. *Theory of systems and transformations in optics; per. from Engl. Moscow: Mir; 1971. 495 p. (In Russ.).*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Казаков Василий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – оптика и спектроскопия, квантовые технологии.

Китаев Вениамин Вадимович, аспирант, ассистент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – оптика, спектроскопические методы и методики.

Поступила в редакцию 28.11.2023

Поступила после рецензирования 02.12.2023

Принята к публикации 29.01.2024

Kazakov Vasily I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Means, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – optics and spectroscopy, quantum technologies.

Kitaev Veniamin V., Postgraduate Student, Assistant at the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Means, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – optics, spectroscopic methods and techniques.

Received 28.11.2023

Revised 02.12.2023

Accepted 29.01.2024

Подбор оптимального режима работы датчика измерения вакуума Пирани

Евгений Викторович Рутков¹

rutkov@ms.ioffe.ru

Юлиана Александровна Новикова¹

✉ nov-jliana@yandex.ru, orcid.org/ 0000-0003-2043-188С, SPIN-код: 2255-1563

Александр Антонович Казаев¹

icorprussia@gmail.com

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Проведено изучение работы датчика Пирани в широком интервале давлений $1000 \div 10^{-2}$ мбар в атмосфере воздуха и азота. Показано, что как в режиме стабилизации тока, так и в режиме стабилизации температуры наблюдается существенный унос мощности нагревателя при изменении давления газа в камере. В режиме стабилизации температуры удалось уменьшить рабочую температуру нагревателя до $1000 \div 200$ °С, что позволило применять в качестве материала нагревателя датчика вольфрам.

Ключевые слова: измерение вакуума, датчик Пирани, вольфрам, азот, воздух

Для цитирования: Рутков Е. В., Новикова Ю. А., Казаев А. А. Подбор оптимального режима работы датчика измерения вакуума Пирани // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 1. С. 51–55. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-51-55.

Original article

Optimization of operating conditions for a Pirani vacuum gauge

Evgeniy V. Rutkov¹

rutkov@ms.ioffe.ru

Yuliana A. Novikova¹

✉ nov-jliana@yandex.ru, orcid.org/ 0000-0003-2043-188С, SPIN-code: 2255-1563

Alexandr A. Kazaev¹

icorprussia@gmail.com

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. A study of the Pirani sensor operation in a wide pressure range of $1000 \div 10^{-2}$ mbar in air and nitrogen atmospheres has been carried out. It is shown that both in the heating current stabilization mode and in the temperature stabilization mode, a significant heating power loss is observed when the gas pressure in the chamber changes. In temperature stabilization mode, it was possible to reduce the operating temperature of the heater up to $1000 \div 200$ °C, which made it possible to use tungsten as the sensor heater material.

Keywords: vacuum measurement, Pirani sensor, tungsten, nitrogen, air

For citation: Rutkov E. V., Novikova Yu. A., Kazaev A. A. Optimization of operating conditions for a Pirani vacuum gauge. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2024;3(1):51–55. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-51-55.

Введение

В последнее время наблюдается стремительный рост спроса на гибридное измерение как нормального, так и сверхнизкого давления, причем увеличение интереса к сверхточным датчикам широкого диапазона значений давлений наблюдается стабильно не только в аэрокосмической отрасли для аэродинамических задач, но и в таких динамично развивающихся областях, как медицинская техника (в аппаратах искусственной

вентиляции легких и диализных аппаратов) и системы типа «умного» дома.

Более того, в полупроводниковой промышленности для выращивания чистого кремния требуется вакуумная среда для уменьшения молекулярного загрязнения, а этапы микрообработки, включая реактивное ионное травление, химическое осаждение из газовой фазы и физическое осаждение из газовой фазы, также должны выполняться в вакууме с чистой средой. Для контроля информации о вакууме в таких средах требуются датчики вакуума.

При этом отдельно существующая проблема указанного класса датчиков – это задача обеспечения высокой точности результатов измерения, в том числе при постоянстве тех физических параметров, которые напрямую коррелируют с результатами измерений, а именно – стабилизации электрических и температурных характеристик.

Такой подход минимизирует и производственные затраты, поскольку снижает необходимость в индивидуальном тестировании и калибровке датчиков (что может увеличить время изготовления и технологический процесс), увеличивает точность и эффективность работы систем, в которые датчик будет вмонтирован, помогает оптимизировать время безотказной работы системы и обеспечивает превосходную взаимозаменяемость датчиков (разница в точности измерений минимальна).

Предложенный Марселло Пирани почти сто лет назад термоэлектрический датчик [1] и сейчас является одним из основных приборов для измерения «низкого вакуума» $1000 \div 10^{-2}$ мбар [2–5].

В настоящее время ведутся разработки датчиков Пирани на основе тонкопленочных систем по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) [5]. Это позволяет достичь высокого отношения поверхности нагревателя к его объему, что, возможно, сможет увеличить чувствительность датчика со стороны «высокого вакуума» до $10^{-3} \div 10^{-4}$ мбар. Однако нагреватели из тонкой проволоки остаются востребованными, так как они надежны и технологически просты. Принцип измерения такого типа вакуумметра Пирани достаточно простой. Металлический провод нагревается электрическим током. Если провод находится в идеальном вакууме, в нем нет газа и, следовательно, нет потерь тепла. В реальных условиях (не в идеальном вакууме) окружающий газ будет отводить тепло/энергию от провода. Количество отводимого тепла связано с количеством молекул газа и, следовательно, с давлением.

Целями работы являются сравнительное изучение работы датчика Пирани в режиме стабилизации тока и стабилизации температуры и исследование условий, которые могут приводить к увеличению потенциальной точности измерений.

Материал и методы исследования

В качестве нагревателя датчика использовали вольфрамовую проволоку диаметром 100 мкм и длиной 10 см.

Эксперименты проводили с использованием вакуумного поста с откачкой безмасляным форнасосом и турбомолекулярным насосом EDWARDS с откачкой до 10^{-7} мбар. Для оценки давления вакуума в широком диапазоне использовали два прибора. Первый из них – вакуумметр (типа ВИТ-2), который позволяет проводить замеры в диапазоне малых значений давлений от 10^{-6} – 10^{-4} бар, а второй барометр (типа TYRACONT VSC43 VM) служил для получения оценок в более высоком диапазоне значений – от 10^{-4} до 1 бар. В установке имелась возможность использовать игольчатый натекагель для дозированного напуска в камеру азота или воздуха. Температуру вольфрамовых нитей можно определить, используя известную формулу $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ при $\alpha = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [6]. Для оценки малых температур и дрейфов был использован микропирометр. Достигнута высокая степень корреляции между значениями пирометрических температур и температур, которые удалось оценить вакуумметрическим методом. Чтобы получить наиболее достоверную оценку сопротивления нити, была использована четырехпроводная схема включения в систему, в которой достигается развязка по питанию для нити накала с процедурой измерения на ней падения напряжения.

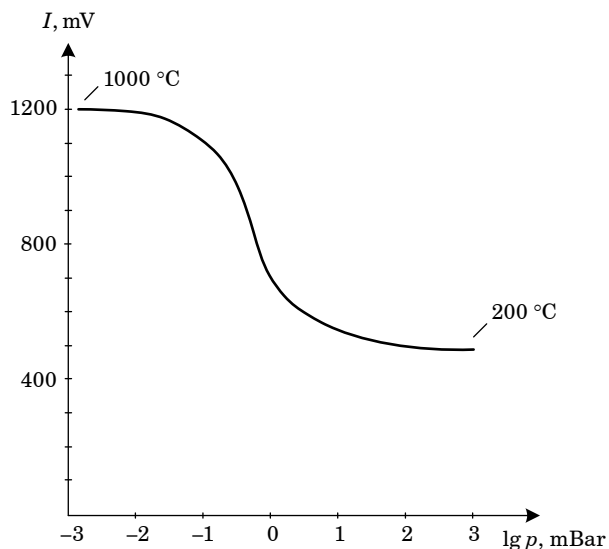
Результаты исследования и их обсуждение

Зависимость падения напряжения на W нити от давления азота в камере показана на рис. 1.

Значение тока равно $I = \text{const} = 450$ мА. Видим, что при $p < 10^{-3}$ мбар имеется хорошая «полочка» – напряжение на нити не меняется с уменьшением давления. Как показано в нашей работе [7], при $p < 10^{-3}$ мбар малый поток молекул азота на нить не может ее охладить. При $p > 0,1$ мбар имеется слабая зависимость напряжения на нити от давления, но причина иная – в этом случае унос тепла с нити определяется не потоком газа к поверхности (он растет с увеличением давления), а временем жизни молекул газа на нагревателе [7]. Эксперимент показал, что можно повысить эффективность работы датчика, увеличив ток через нить, т. е. увеличив температуру нити.

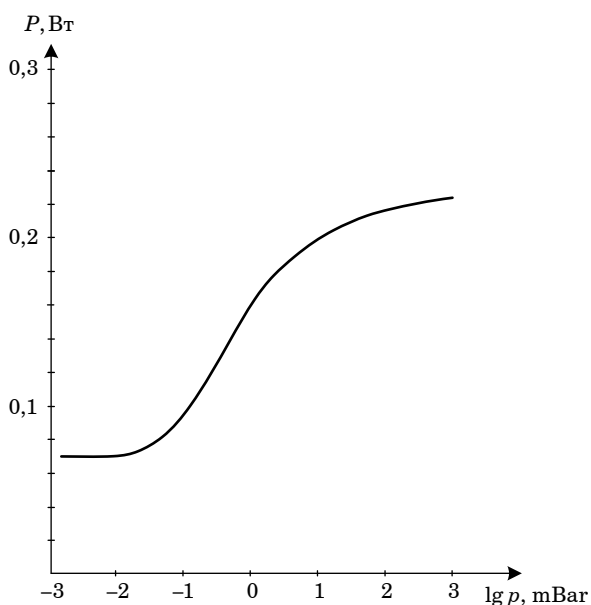
Но это катастрофично для нагревателей из вольфрама – они быстро сгорают. Чтобы избежать этого, необходимо перейти на работу датчика в режиме постоянной низкой температуры.

На рис. 2. показана зависимость мощности $p = IU$ на вольфрамовой нити от давления азота, когда температура (сопротивление) поддержива-



• *Рис. 1. Зависимость напряжения на W нити от давления азота $\lg p$, $I = \text{const} = 450 \text{ mA}$. На крайних точках указана температура нити*

• *Fig. 1. Dependence of the voltage on the W filament on the nitrogen pressure $\lg p$, $I = \text{const} = 450 \text{ mA}$. The filament temperature is indicated at the extreme points*



• *Рис. 2. Зависимость мощности на W нити $P = IU$ от давления азота $\lg p$ для случая $R = \text{const}$ ($t = \text{const} = 200 \text{ °C}$)*

• *Fig. 2. Dependence of the power on the W filament $P = IU$ on the nitrogen pressure $\lg p$ for the case of $R = \text{const}$ ($t = \text{const} = 200 \text{ °C}$)*

ется постоянной $t = \text{const} = 200 \text{ °C}$, что безопасно для нагревателей из вольфрама.

Для этих целей можно использовать схему, когда нагреватель датчика Пирани включают в одно из плеч моста Уинстона. В настоящее время постоянство температуры (сопротивления)

проще стабилизировать цифровым способом: ток через нагреватель и напряжение на нем оцифровываются, микропроцессор рассчитывает их отношение, пропорциональное сопротивлению нити $R = \frac{U}{I}$. Следящий режим стабилизации этого отношения реализуется микропрограммно, а в качестве выходного электрического сигнала используют мощность, рассчитанную на нити. При реализации цифрового способа измерений используется схемотехническое решение без дополнительного аналогового блока предварительного усиления входного сигнала, когда возможные температурные и временные дрейфы и шумы аналоговых элементов сосредоточены только во входной части аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Величина их указанных дрейфов должна быть обязательно учтена, чтобы в процессе проведения измерений сопротивления не было бы соответствующего ухудшения потенциальной точности датчика. После калибровки датчика показания вакуума высвечиваются на мини-дисплее.

Для потенциального повышения точности следует снижать и те шумы АЦП, которые не являются тепловыми шумами, а представляют собой шумы квантования. В дальнейшем можно запланировать такую схемную реализацию экспериментального измерительного датчика, которая будет использовать в своем составе 24-разрядный относительно быстродействующий АЦП. Для последнего также важно получить данные предварительной оценки статистических параметров шумовых процессов, характерных для разных интервалов времени работы, начиная от минутного и заканчивая суточными. Анализ, учет этих данных могут быть полезными как с точки зрения повышения потенциальной точности датчика, так и для выработки требований к схемной реализации АЦП и к таким техническим параметрам, как число уровней квантования и темп дискретизации отчетов сигнала.

Еще одним полезным дополнением к технической реализации измерительной экспериментальной аппаратуры, которая использована на этапе испытаний, является дополнение в виде энергонезависимой флеш-памяти, куда могут регистрироваться и долговременные результаты, в том числе для оценки изменения точности датчика при его длительной эксплуатации, с оценкой для более точного определения допустимого гарантийного срока работы.

При проведении экспериментов в текущем варианте исполнения был осуществлен последовательный переход от азота к атмосферному воздуху. При проведении сравнительного анализа



- *Рис. 3. Реализация нагревателей*
- *Fig. 3. Implementation of heaters*

результатов, полученных до и после перехода, не обнаружилось каких-либо отличий, что неудивительно, так как в составе воздуха присутствует 78 % азота.

Для исследований использовали вольфрамовые нагреватели. Они изначально входили в состав галогеновых ламп мощностью порядка 20 Вт. Их конструкция выполнена из провода диаметром 100 мкм в виде спирали диаметром ~1,0 мм и длиной ~5 мм.

Для получения нагревателей лампы вскрывались на атмосферу, срезалась верхняя часть стекла, при этом спираль и ее крепеж оставались нетронутыми (рис. 3). Получена отличная воспроизводимость результатов при переходе от одного датчика к другому.

Заключение

В работе определен оптимальный режим работы вакуумного датчика типа Пирани с вольфрамовым нагревателем, связанный с поддержанием постоянной низкой температуры нагревателя $100 \div 200$ °С, что обеспечивает их долгую и надежную работу при измерении низкого давления в диапазоне $10^{-2} \div 1000$ мбар.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Pirani M. S. Self-indicating vacuum measuring instrument // Dtsch. phys. ges. verh. 1906. Vol. 8. P. 686.
2. A composite-type MEMS Pirani gauge for wide range and high accuracy / S. Cheng [et al.] // Sensors. 2023. Vol. 23. P. 1276. Doi: <https://doi.org/10.3390/s23031276>.
3. An ultra-compact MEMS Pirani sensor for in-situ pressure distribution monitoring / L. Zhang [et al.] // Micromachines. 2022. Vol. 13. P. 1686. Doi: <https://doi.org/10.3390/mi13101686>.
4. Comparisons between membrane, bridge and cantilever miniaturized resistive vacuum gauges / K. G. Punchihewa [et al.] // Sensors. 2012. Vol. 12. P. 8770. Doi: <https://doi.org/10.3390/s120708770>.
5. Overview of the MEMS Pirani sensors / S. Xu [et al.] // Micromachines. 2022. Vol. 13. P. 945. Doi: <https://doi.org/10.3390/mi13060945>.
6. Эспе В. Технология электровакуумных материалов. Т. 1. М.; Л.: Гос. энергет. изд-во, 1962. 631 с.
7. Рутыков Е. В., Беляев О. А., Галль Н. Р. Физические процессы в датчике низкого вакуума типа Пирани // Журнал техн. физики. 2023. Т. 93, № 2. С. 286. Doi: <http://dx.doi.org/10.21883/JTF.2023.02.54505.187-22>.

REFERENCES

1. Pirani M. S. Self-indicating vacuum measuring instrument. Dtsch. phys. ges. verh. 1906;8:686.
2. Chen S., Feng L., Guo S., Ji Y., Zeng S., Peng X., Xu Y., Hu T., Wu Z., Wang S. A composite-type MEMS Pirani gauge for wide range and high accuracy. Sensors. 2023;23:1276. Doi: <https://doi.org/10.3390/s23031276>.
3. Zhang L., Lu J., Takagi H., Matsumoto S., Higurashi E. An ultra-compact MEMS Pirani sensor for in-situ pressure distribution monitoring. Micromachines. 2022;13:1686. Doi: <https://doi.org/10.3390/mi13101686>.
4. Punchihewa K. G., Zaker E., Kuljic R., Banerjee K., Dankovic T., Feinerman A., Busta H. Comparisons between membrane, bridge and cantilever miniaturized resistive vacuum gauges. Sensors. 2012;12:8770. Doi: <https://doi.org/10.3390/s120708770>.
5. Xu S., Zhou N., Shi M., Zhang C., Chen D., Mao H. Overview of the MEMS Pirani sensors. Micromachines. 2022;13:945. Doi: <https://doi.org/10.3390/mi13060945>.
6. Espe V. Technology of electro-vacuum materials. Vol. 1. Moscow; Leningrad: State Energy Publishing House; 1962. 631 p. (In Russ.).

7. Rutkov E. V., Belyaev O. A., Gall N. R. Physical processes in the Pirani type low vacuum sensor. *J. tech. phys.* 2023;93(2):286. (In Russ.). Doi: <http://dx.doi.org/10.21883/JTF.2023.02.54505.187-22>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Рутьков Евгений Викторович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – прикладная физика, измерительная техника, графен.

Новикова Юлиана Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – оптика, физика конденсированного состояния, наноиндустрия.

Казаев Александр Антонович, студент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – оптика, наноиндустрия.

Rutkov Evgeniy V., Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor at the Department of Physics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – applied physics, measurement technology, graphene.

Novikova Yuliana A., PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department of Physics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – optics, condensed matter physics, nanoindustry.

Kazaev Alexandr A., Student at the Department of Physics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – optics, nanoindustry.

Поступила в редакцию 09.01.2024

Поступила после рецензирования 11.01.2024

Принята к публикации 29.01.2024

Received 09.01.2024

Revised 11.01.2024

Accepted 29.01.2024

Автоматизированная система для сканирования пространственной структуры плазменной струи методом оптической эмиссионной спектроскопии

Александр Андреевич Дьяченко¹

✉ dyachenko_180396@rambler.ru, orcid.org/0000-0001-5473-8324, Author ID: 1093463, SPIN-код: 2814-0654

Михаил Эрнестович Пинчук¹

pinchme@mail.ru, orcid.org/0000-0002-1948-0329, Author ID: 125915, SPIN-код: 1313-7645

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Описан разработанный программно-аппаратный комплекс для регистрации спектральной пространственной информации о быстротекающих процессах в конденсированных средах с высоким временным и пространственным разрешением. Представлены данные измерений полей распределения температуры в тонкой плазменной струе в потоке гелия и аргона при помощи данного комплекса.

Ключевые слова: оптическая эмиссионная спектроскопия, обработка данных, автоматизация измерений

Для цитирования: Дьяченко А. А., Пинчук М. Э. Автоматизированная система для сканирования пространственной структуры плазменной струи методом оптической эмиссионной спектроскопии // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 1. С. 56–62. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-56-62.

Original article

Automated system for scanning the spatial structure of a plasma jet using optical emission spectroscopy

Alexandr A. Dyachenko¹

✉ dyachenko_180396@rambler.ru, orcid.org/0000-0001-5473-8324, Author ID: 1093463, SPIN-code: 2814-0654

Mikhail E. Pinchuk¹

pinchme@mail.ru, orcid.org/0000-0002-1948-0329, Author ID: 125915, SPIN-code: 1313-7645

¹ Institute for Electrophysics and Electrical Power of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The developed software and hardware complex for recording a two-dimensional spectral pattern is described. The temperature space distribution in a thin plasma jet in helium and argon using the system are presented.

Keywords: optical emission spectroscopy, data analysis, automation of measurements

For citation: Dyachenko A. A., Pinchuk M. E. Automated system for scanning the spatial structure of a plasma jet using optical emission spectroscopy. *Innovacionnoe priboroostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(1):56–62. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-56-62.

Введение

Устройства на основе газового разряда используются во многих областях науки и техники [1]. В большинстве случаев и в научных исследованиях, и при практическом применении требуется определять и контролировать параметры плазмы в этих газоразрядных системах. Это особенно важно для устройств, использующихся в области медицины [2]. Оптическая эмиссионная спектроскопия является удобным и информативным методом исследований плазмы [3]. В настоящее время появились средства автоматизации сбора

и анализа информации, которые применительно к спектральной диагностике плазмы открывают широкие возможности для изучения различных свойств и процессов, происходящих в плазме. Эти средства позволяют собирать и обрабатывать данные в режиме реального времени, что делает спектральную диагностику плазмы еще более ценной для научных исследований и практических применений.

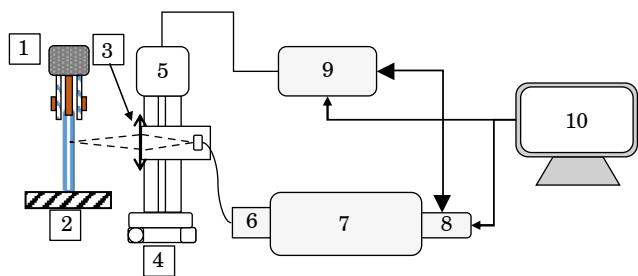
Ранее [4] нами исследовалось распределение температур при сканировании холодной плазменной струи атмосферного давления. Проведенный анализ показал необходимость получения большего

массива спектральных данных с усложнением подхода к их регистрации и интерпретации. Необходимо проводить поперечное сканирование колеблющейся тонкой (единицы миллиметров) плазменной струи, регистрируя множество однотипных кадров без изменения параметров разряда. При выяснении радиальной структуры осесимметричной плазменной струи имеет место преобразование Абеля. При недостаточной светосиле оптической системы имеет смысл делать множество снимков и последующее сложение спектров по кадрам при обработке данных одномерного измерения. В настоящей работе мы представляем описание автоматизированного комплекса сбора и анализа спектральных данных для пространственной диагностики газоразрядной плазмы методами оптической эмиссионной спектроскопии.

Материал и методы исследования

Исследовалась холодная плазменная струя в потоке гелия в атмосферу воздуха на основе барьерного разряда. Описание источника и экспериментальной установки можно найти в [5].

Схема установки состоит из плазменной ячейки барьерного разряда (1 на рис. 1). В некоторых экспериментах рассматривается струя, взаимодействующая с мишенью 2. Для регистрации спектральных данных с пространственным разрешением использовалась система линейных трансляторов 4, 5, снабженная системами синхронизации между механической частью (шаговые двигатели) и регистрирующей (светочувствительная матрица в спектральном приборе). Коллимационная система 3 перемещается с помощью горизонтального 4 и вертикального 5 линейных трансляторов. Свет фокусируется кварцевой линзой с фокусным расстоянием 5 см на торец оптического волокна 6, сечение входного конца которого представляет собой круг, а выходного – щель. Входная щель спектрографа ДФС-452 раскрыта полностью, аппарат-

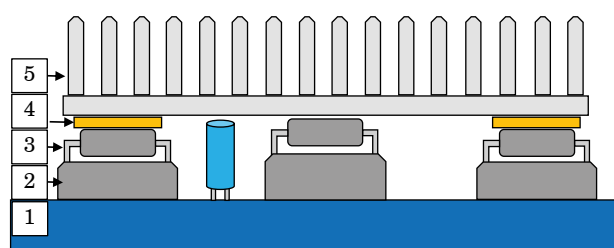


• Рис. 1. Общая схема экспериментальной установки. Пояснения даны в тексте
 • Fig. 1. Experimental setup general scheme. Explanations are given in the text

ное уширение и светосила определяются выходным сечением оптического волокна. Оптическое волокно устанавливается в плоскости входной щели и регулируется микрометрическими винтами в плоскостях для изначальной подстройки. После прохождения спектрографа свет попадает на светорегистрирующую матрицу съемочной камеры 8 Andor Newton. Система линейных трансляторов управлялась на основе микроконтроллера 9 Wavgat Uno. Программное управление матрицей и микроконтроллером осуществлялось с помощью компьютера 10.

Сканирующая система базируется на двух линейных трансляторах на основе шаговых двигателей, питаемых микроконтроллером Wavgat UNO через драйвер Arduino L293D. Система питается от лабораторного источника питания. Напряжение питания драйвера 7 В было выбрано опытным путем с целью обеспечить максимальную надежность и точность позиционирования системы. Так как номинальный ток двигателей – порядка 1 А, а максимальный допустимый ток через драйвер Ардуино L293D ограничен величиной 0,5 А, то потребовалась дополнительная система охлаждения, изображенная на рис. 2.

В связи с нерасчетными режимами работы драйвера было принято решение работать без подачи тока на катушку в статичном режиме во избежание перегрева не оснащенной переходником под радиатор микросхемы в пластиковом корпусе. Также данное решение позволяет проводить позиционирование системы вручную. Во время длительных съемок в режиме ожидания синхроимпульсов радиатор может нагреваться выше



• Рис. 2. Система охлаждения драйвера шагового двигателя L293D для Ардуино: 1 – печатная плата; 2 – подложка под микросхему DIP16; 3 – микросхема двойного H-моста L293D; 4 – промежуточная медная подложка для поднятия радиатора над выступающими элементами схемы (центральная микросхема – мультиплексор и конденсаторы); 5 – алюминиевый радиатор. Термоинтерфейсы выполнены на основе термопасты КПТ-8
 • Fig. 2. Cooling system for L293D stepper motor driver for Arduino: 1 – printed circuit board; 2 – substrate for the DIP16 chip; 3 – L293D double H-bridge chip; 4 – intermediate copper substrate for raising the radiator above protruding circuit elements (central multiplexer chip and capacitors); 5 – aluminum radiator. Thermal interfaces are made with KPT-8 thermal paste

40 °С. Без радиатора микросхемы быстро перегреваются и входят в режим защиты.

Программная часть.

Алгоритм работы микроконтроллера

Система сбора данных реализована на стандартном языке программирования для Arduino [6]. Язык среды Arduino IDE является С-подобным языком программирования. Приведем описание блок-схемы программы, изображенной на рис. 3:

1) обработчик порта. Чтение строки из буфера порта;

2) разделение строки по разделителю (пробел) на массив односложных команд (максимум 50 для экономии памяти);

3) выполнение команд с выводом системных сообщений в СОМ-порт;

4) после выполнения всех команд система ожидает приход новых инструкций.

Для передачи инструкций в микроконтроллер используется язык инструкций собственной разработки. Краткая сводка команд:

1) А (число актов движения). К примеру, «А10» – «сделать 10 актов движения» (по одному или несколько шагов каждый) двигателем А в положительном направлении, «А-10» – в отрицательном;

2) В (число актов движения) – то же самое, но для двигателя В;

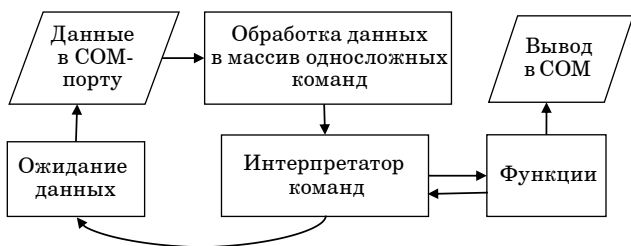
3) МА или МВ (число оборотов в минуту) – задание скорости вращения двигателей А и В соответственно;

4) S (число шагов) – задание числа шагов на акт движения. Например, при задании «S10 A9» система проедет девять раз по десять шагов;

5) Tu и Td – задание триггера по фронту импульса Trigger Fire («едем в момент начала съемки») или по его спаду («едем сразу после съемки»);

6) T1 и T0 – включение и выключение режима работы по запускающему импульсу;

7) Z0 – принять точку, где находится каретка, за ноль координат;



• Рис. 3. Блок-схема программы контроллера Arduino для управления шаговым двигателем

• Fig. 3. Block diagram of the Arduino controller program for controlling a stepper motor

8) Z1 – «поехать в ноль координат». Сбрасывает режим запуска по триггеру;

9) I (мс) – ширина импульса прямоугольного сигнала на выходе микроконтроллера для подачи на вход External trigger-матрицы. Сигнал идет с периодичностью 2I мс. Режим выдачи импульсов отключается при команде I0;

10) С (число импульсов) – количество импульсов, необходимое для продолжения движения. Например, при С50 А10 один шаг требует приход 50 импульсов. Итого для выполнения требуется 500 входящих импульсов;

11) Abort – отмена задания. В отличие от остальных команд, можно вызвать в любой момент.

Когда микроконтроллер готов принимать команды, в СОМ-порт выдается сообщение «Begin». При движении микроконтроллер выдает сообщения, состоящие из трех цифр:

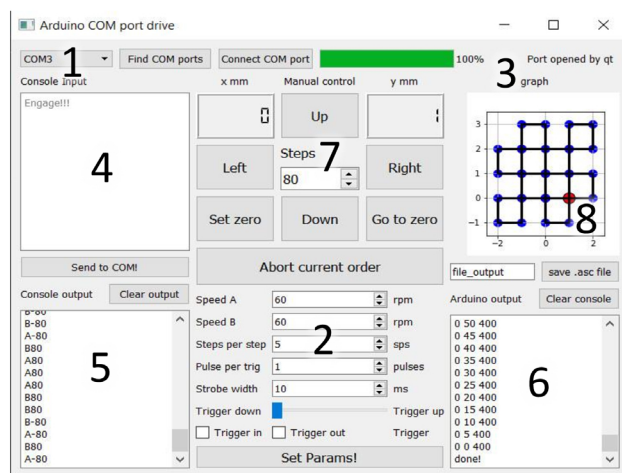
1) номер «кадра». Если работаем в режиме без внешнего триггера, то всегда ноль. Используется для последующей реконструкции движения при обработке данных;

2) координата X в условных шагах. Пространственное разрешение линейных трансляторов – 400 шагов на миллиметр;

3) координата Y. Разрешение аналогично координате X.

При изменении параметров и переменных в СОМ-порт выводятся системные сообщения, которые можно прочитать в специальном окне.

Программный интерфейс, написанный на языке Python с использованием библиотеки PyQT, выглядит следующим образом (рис. 4). Программа находит СОМ-порт 1, при попытке подключения компьютер отправляет на микроконтроллер за-



• Рис. 4. Интерфейс программы управления на компьютере, выполненный с помощью библиотеки PyQT5. Пояснения даны в тексте

• Fig. 4. Program interface on PyQT5. Explanations are given in the text

прос с параметрами из области 2. При получении действительного ответа (слово «Begin», означающее, что платформа Arduino загрузилась и готова принимать инструкции) программа регистрирует подключение 3. Ввести данные на специально разработанном языке (аналог g-кода) можно через окно 4. Отправленные в порт данные отображаются в меню 5. Принятые из порта данные отображаются в меню 6. Ручное управление двигателями по двум осям отображается в 7. Графическое изображение пройденной и прогнозируемой траекторий из введенного в меню 4 с возможностью сохранить координаты в файл показано в 8.

Алгоритм съемки

Для пространственного разрешения спектральных данных съемка спектров в режиме kinetic (запись множества кадров) производилась одновременно с перемещением области сбора света вдоль/поперек плазменной струи. Для синхронизации использовали режим съемки External trigger (съемка производилась только после прихода запускающего синхроимпульса). В момент съемки камера выдает логическую единицу на логическом выходе (триггер Fire), подключенном к микроконтроллеру двигателя.

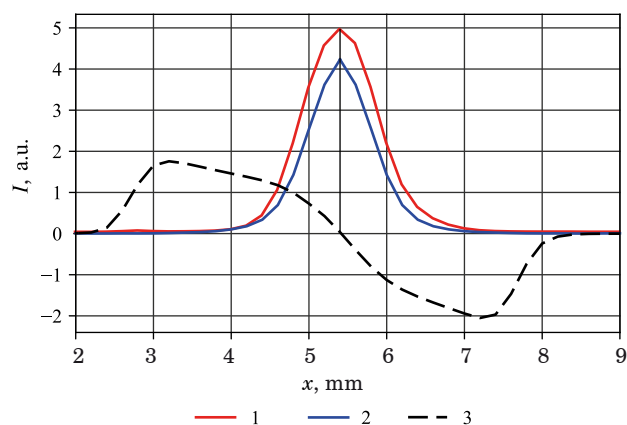
В свою очередь, движение каретки на определенное число шагов двигателя производилось после прихода определенного числа импульсов триггера Fire. После завершения этапа движения микроконтроллер начинал выдавать импульсы на логический вход матрицы External Trigger, снова запуская процесс съемки кадра.

1. Arduino выдает на выход прямоугольные импульсы с полупериодом Strobe Width (по умолчанию – 10 мс).

2. При нажатии кнопки съемки в режиме External Trigger матрица по приходу импульса делает кадр, во время съемки которого на выход Fire подается логическая единица.

3. Счетчик импульсов Arduino работает в режиме системных прерываний и обрабатывает входные импульсы любой длительности. Микроконтроллер регистрирует пришедший импульс и выполняет инструкции, прописанные в загруженной в порт программе. После выполнения очередной инструкции переходит к п. 1; если дальнейших инструкций нет, объявляет о завершении задания.

Отснятые в режиме kinetic спектры сохраняются на компьютер в текстовый файл в формате *.csv. Первая колонка файла содержит длины волн. В остальных колонках записывается интенсивность света.



• Рис. 5. Нахождение центра струи с последующим преобразованием Абеля: 1 – «сырые» данные; 2 – данные после прохождения преобразования Абеля относительно центра струи. Центр струи находится исходя из соображений симметрии; 3 – разность между двумя сторонами графика относительно определенной точки

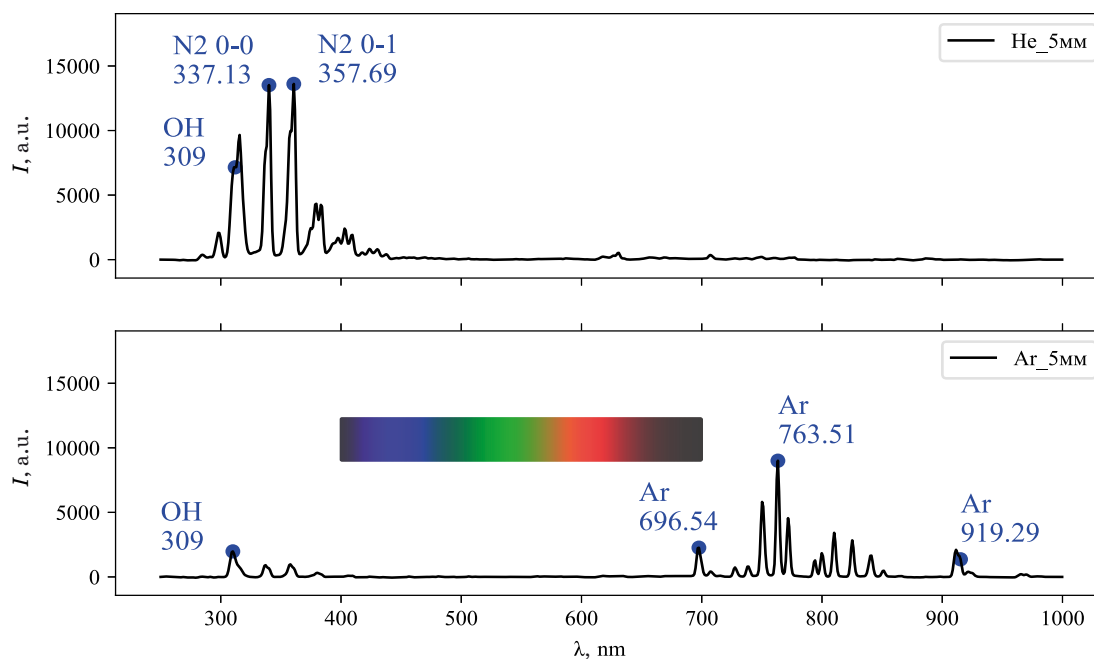
• Fig. 5. Searching the center of the jet with subsequent Abel transformation: 1 – raw data; 2 – data after passing the Abel transform relative to the center of the jet. The center of the jet is found based on symmetry considerations; 3 – the difference between the two sides of the graph relative to a certain point

Полученные при съемке массивы спектров сохраняются на компьютер, происходит первоначальная обработка, которая заключается в гауссовом размытии кадров изображений и (или) усреднении спектров с целью увеличить соотношение «сигнал – шум». При движении перпендикулярно направлению струи производится поиск центра струи с последующим преобразованием Абеля.

Для надежного нахождения центра струи алгоритм находит точку, вокруг которой разница между двумя ветвями (слева и справа) минимальна по модулю. Далее производится сложение левой и правой ветвей струи (считая струю осесимметричной) с последующим преобразованием Абеля. Пример работы алгоритма приведен на рис. 5.

Результаты исследования и их обсуждение

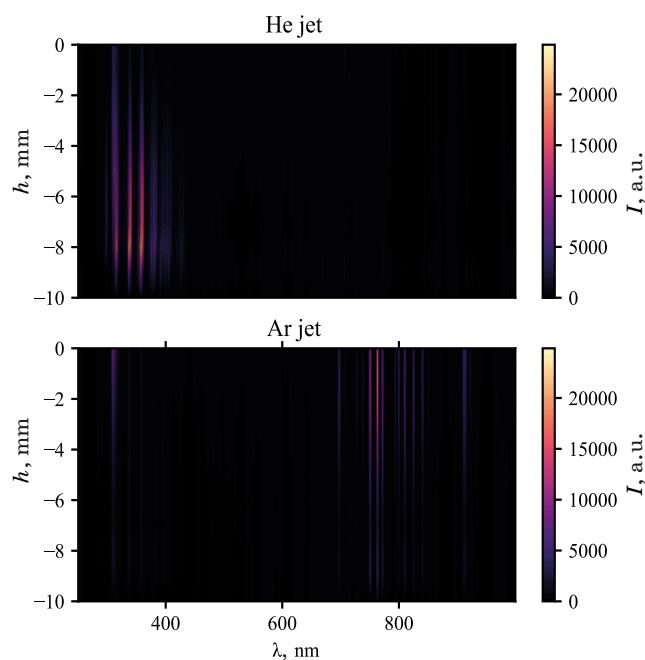
Были проведены несколько серий экспериментов при использовании различных газов. Обзорный интегральный спектр, зарегистрированный спектрографом СМ-2020 (ОКБ «Спектр», Россия), показан на рис. 6. Наблюдаются характерные различия в спектрах для струй в гелии и аргоне: в гелиевой струе сильнее возбуждались линии молекулярного азота, в аргонной струе наиболее интенсивны линии гидроксил-радикалов ОН и атомарные линии аргона.



- *Рис. 6. Обзорный интегральный спектр плазменных струй гелия и аргона*
- *Fig. 6. Survey spectrum of plasma jets of helium and argon*

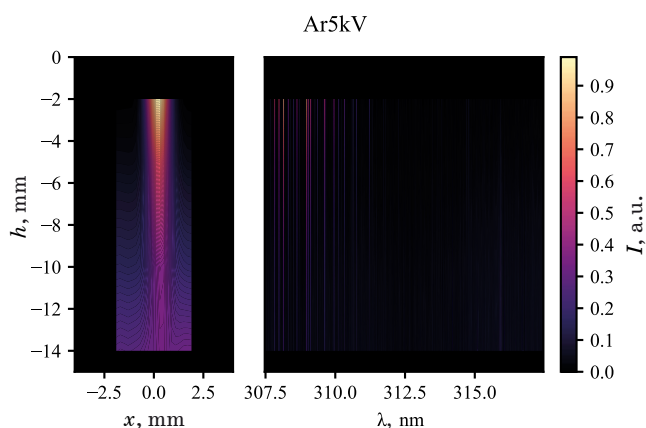
Для гелиевой струи интенсивность полосы N_2 росла по длине струи с увеличением расстояния от торца разрядной трубки ввиду увеличения концентрации азота в результате подмешивания окружающего воздуха в поток гелия. Это обусловлено эффективным возбуждением и ионизацией молекул азота возбужденными атомами гелия. Также регистрируется полоса излучения OH, но интенсивность излучения убывает по длине струи, и определение температуры в струе по излучению этой полосы для гелиевой струи возможно только на небольшом расстоянии от среза трубки ввиду ее ощутимого убывания с расстоянием от него. Аргоновая струя имеет меньший излучающий диаметр, чем гелиевая. Для струи аргона, наоборот, характерны интенсивные линии аргона и OH. Основное свечение производится за счет молекулярной системы радикала OH и линий аргона. Линии азота возбуждаются слабее. Обзорные спектры на разных удалениях от источника изображены на рис. 7.

Так как оси перемещения точки сбора света X и Y , вообще говоря, не совпадают с направлением струи из-за неточностей позиционирования источника плазмы относительно оптического стола и аэродинамических эффектов, то в случае измерений с перемещением точки света вдоль одной из осей без дополнительного сканирования перпендикулярно этой оси результат будет неудовлетворительным. Пример неточного позиционирования источника плазменной струи относительно вертикальной оси изображен на рис. 8. Спектры в случае поперечного сканирования для двух расстояний от источника показаны на рис. 9.

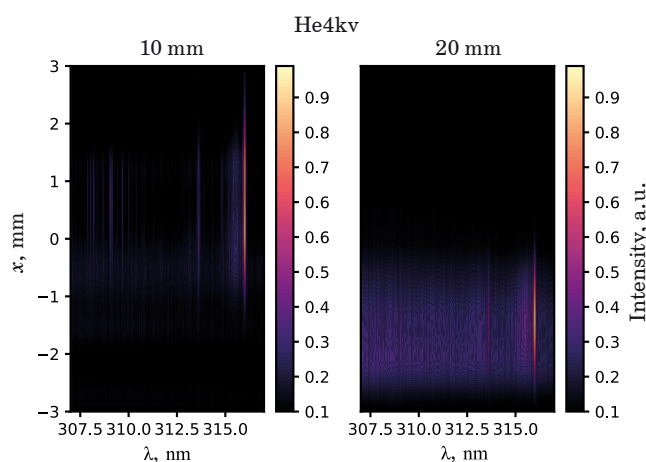


- *Рис. 7. Обзорные спектры исходящих в открытый воздух (направленных вниз) плазменных струй гелия и аргона при сканировании вдоль струи с использованием спектрографа SM-2020*
- *Fig. 7. Survey spectra of plasma jets of helium and argon effluent into the open air (directed downwards) when scanning along the jet using the SM-2020 spectrograph*

Для измерения температур вращательных подуровней молекул плазмы используется метод аппроксимации молекулярных полос в программе MassiveOES [7, 8].



• *Рис. 8. Результаты сканирования плазменной струи аргона. Хорошо заметно отклонение струи от вертикали*
 • *Fig. 8. Results of scanning an argon plasma jet. The deviation of the jet from the vertical is observed*

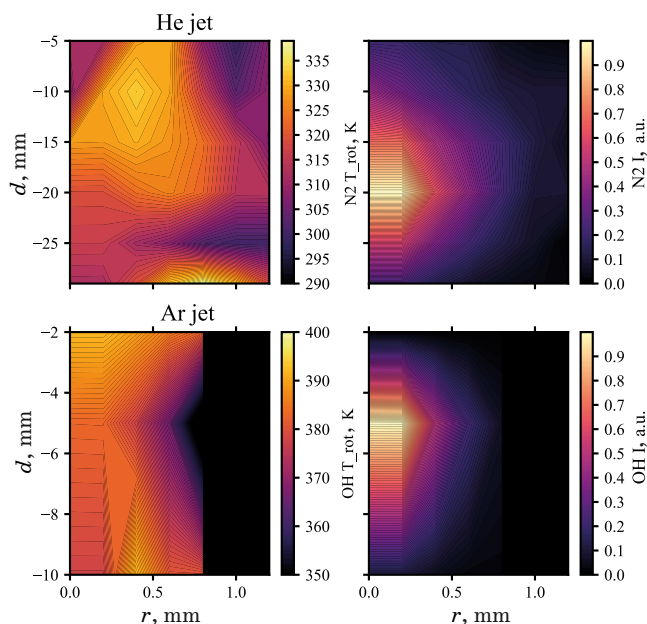


• *Рис. 9. Положение струи в кадре. Для различных кадров шкала интенсивностей нормируется независимо*
 • *Fig. 9. Position of the jet in the frame. For different frames, the intensity scale is normalized independently*

Спектры аппроксимируются модельными спектрами колебательно-вращательных переходов. Для аппроксимации используется нелинейный метод наименьших квадратов, действующий по алгоритму Левенберга – Маркуарда (Levenberg – Marquardt), используя в качестве модельных параметров относительную концентрацию, а также температуры колебательных и вращательных подуровней молекул азота и ОН.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. The 2017 plasma roadmap: low temperature plasma science and technology / I. Adamovich [et al.] // Journal of physics D: Applied physics. 2017. Vol. 50, № 32. P. 323001. Doi: 10.1088/1361-6463/aa76f5.
2. Fridman A., Friedman G. Plasma medicine. John Wiley & Sons, Ltd, 2013. 545 p. Doi: 10.1002/9781118437704.
3. Очкин В. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М.: Физматлит, 2006. 472 с.



• *Рис. 10. Измеренное распределение температур вращательных подуровней и относительных концентраций молекул N₂ и ОН для гелиевой и аргоновой струй*
 • *Fig. 10. Measured distribution of rotational sublevels temperatures and relative concentrations of N₂ and OH molecules for helium and argon jets*

Измеренная этим методом двумерная картина распределения температур и интенсивностей в плазме изображена на рис. 10.

ВЫВОДЫ

1. Разработана и апробирована система автоматизации и позиционирования линейных трансляторов для проведения оптических измерений методом эмиссионной спектроскопии. Разработан удобный программный интерфейс. Система обеспечивает низкую погрешность позиционирования и надежность непрерывной работы до нескольких часов.

2. Разработанная система с методами обработки позволяет эффективно производить измерения без необходимости точного позиционирования точки сбора света относительно струи. Измерение в одной серии экспериментов производится «в один клик», что сильно упрощает процесс измерения и обработки данных.

4. Дьяченко А. А., Пинчук М. Э., Степанова О. М. Расчет колебательных и вращательных температур в плазменной струе гелия, истекающей в окружающий воздух // Физика низкотемпературной плазмы. Казань: Отечество, 2020. С. 73–74. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44236372> (дата обращения: 17.01.2023).
5. Features of electric field distribution along helium atmospheric plasma jet in stepwise propagation mode of guided streamer / M. E. Pinchuk [et al.] // Eur. phys. J. 2023. Vol. 77, № 6. P. 106. Doi: 10.1140/epjd/s10053-023-00686-6.
6. Arduino IDE. URL: <https://www.arduino.cc/en/software> (дата обращения: 17.01.2023).
7. Batch processing of overlapping molecular spectra as a tool for spatio-temporal diagnostics of power modulated microwave plasma jet / J. Voráč [et al.] // Plasma sources sci. technol. 2017. № 26. P. 025010. Doi: 10.1088/1361-6595/aa51f0.
8. State-by-state emission spectra fitting for non-equilibrium plasmas: OH spectra of surface barrier discharge at argon/water interface / J. Voráč, P. Synek, V. Procházka, T. Hoder // J. phys. appl. phys. 2017. № 50. P. 294002. Doi: 10.1088/1361-6463/aa7570.

REFERENCES

1. Adamovich I., Baalrud S. D., Bogaerts A. et al. The 2017 plasma roadmap: low temperature plasma science and technology. Journal of physics D: Applied physics. 2017;50(32):323001. Doi: 10.1088/1361-6463/aa76f5.
2. Fridman A., Friedman G. Plasma medicine. John Wiley & Sons, Ltd; 2013. 545 p. Doi: 10.1002/9781118437704.
3. Ochkin V. Spectroscopy of low-temperature plasma. Moscow: Physmatlit; 2006. 472 p. (In Russ.).
4. Dyachenko A. A., Pinchuk M. E., Stepanova O. M. Calculation of oscillatory and rotational temperatures in a plasma jet of helium flowing into the surrounding air. Physics of a low-temperature plasma. Kazan: Fatherland; 2020, pp. 73–74. (In Russ.). Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44236372> [Accessed 17 January 2023].
5. Pinchuk M. E., Sretenović G. B., Cvetanović N., Dyachenko A. A., Obradović B. M., Stepanova O. M. Features of electric field distribution along helium atmospheric plasma jet in stepwise propagation mode of guided streamer. The European physical journal D. 2023;77(6):106. Doi: 10.1140/epjd/s10053-023-00686-6.
6. Arduino IDE. Available from: <https://www.arduino.cc/en/software> [Accessed 17 January 2023].
7. Voráč J., Synek P., Potočňáková L., Hnilica J., Kudrle V. Batch processing of overlapping molecular spectra as a tool for spatio-temporal diagnostics of power modulated microwave plasma jet. Plasma sources science and technology. 2017;(26):025010. Doi: 10.1088/1361-6595/aa51f0.
8. Voráč J., Synek P., Procházka V., Hoder T. State-by-state emission spectra fitting for non-equilibrium plasmas: OH spectra of surface barrier discharge at argon/water interface. Journal of physics D: applied physics. 2017;(50):294002. Doi: 10.1088/1361-6463/aa7570.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дьяченко Александр Андреевич, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории диагностики плазмы Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук.

Область научных интересов – создание и эксплуатация систем диагностики плазмы по эмиссионным спектрам.

Пинчук Михаил Эрнестович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией диагностики плазмы Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук.

Область научных интересов – физика газового разряда, применение электрического разряда в жидкости и газе, диагностика плазмы.

Поступила в редакцию 16.12.2023

Поступила после рецензирования 23.12.2023

Принята к публикации 29.01.2024

Dyachenko Alexandr A., Postgraduate Student, Researcher Assistant at the Laboratory of Plasma Diagnostics, Institute for Electrophysics and Electrical Power of the Russian Academy of Sciences.

Research interests – development and operation of plasma diagnostic systems using emission spectra.

Pinchuk Mikhail E., PhD in Technical Sciences, Head at the Laboratory of Plasma Diagnostics, Institute for Electrophysics and Electrical Power of the Russian Academy of Sciences.

Research interests – physics of gas discharge, application of electric discharge in liquid and gas, plasma diagnostics.

Received 16.12.2023

Revised 23.12.2023

Accepted 29.01.2024

Научная статья
УДК 620.1.08

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-63-76

Исследование возможности применения одновиткового вихретокового датчика для измерения дефектов формы

Кирилл Валерьевич Епифанцев¹

✉ epifancew@gmail.com, orcid.org/0000-0002-5705-0282, SPIN-код: 4218-3981

Глеб Анатольевич Петров¹

gapetrov@guap.ru, SPIN-код: 2699-7928

Валентин Николаевич Белопухов²

bvnsam50@gmail.com, SPIN-код: 3801-6191

Олег Александрович Заякин²

oleg_zayakin@mail.ru, SPIN-код: 1948-0485

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара, Российская Федерация

Аннотация. На кругломере RoundTest RA-120P с целью импортозамещения и предотвращения постепенного истирания щупа были проведены эксперименты с бесконтактными датчиками – датчиком вихретокового типа и датчиком лазерным гелиево-ионного типа – с целью создания сдвоенной головки для определения дефектов формы. Рассмотрены результаты эксперимента с различными типами бесконтактных датчиков, также систематизированы различные способы обработки выходных сигналов на основе библиографического и патентного анализа передовых разработок в области измерения дефектов формы. Сформулированы направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: вихретоковый датчик, оптический лазерный датчик, анализ дефектов детали, круглость, радиальное биение, обработка сигналов, формирование круглограммы, бесконтактные измерения

Для цитирования: Епифанцев К. В., Петров Г. А., Белопухов В. Н., Заякин О. А. Исследование возможности применения одновиткового вихретокового датчика для измерения дефектов формы // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 1. С. 63–76. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-63-76.

Original article

Study of the possibility of using a single-turn eddy current sensor for measurement of mold defects

Kirill V. Epifancev¹

✉ epifancew@gmail.com, orcid.org/0000-0002-5705-0282, SPIN-code: 4218-3981

Gleb A. Petrov¹

gapetrov@guap.ru, SPIN-code: 2699-7928

Valentin N. Belopukhov²

bvnsam50@gmail.com, SPIN-code: 3801-6191

Oleg A. Zayakin²

oleg_zayakin@mail.ru, SPIN-code: 1948-0485

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

² Institute of Management Problems of Complex Systems of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russian Federation

Abstract. Experiments with non-contact sensors were carried out on the RoundTest RA-120P roundmeter in order to import substitution and prevent gradual abrasion of the probe: an eddy current sensor and a laser sensor of the helium-ion type in order to create a double head for determining shape defects. The article considers the results of an experiment with various types of contactless sensors, and systematizes various methods of processing output signals based on a bibliographic and patent analysis of advanced developments in the field of measuring shape defects. The directions of further research are formulated.

Keywords: eddy current sensor, optical laser sensor, part defect analysis, roundness, radial runout, signal processing, circular pattern formation, non-contact measurements

For citation: Epifancev K. V., Petrov G. A., Belopukhov V. N., Zayakin O. A. Study of the possibility of using a single-turn eddy current sensor for measurement of mold defects. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(1):63–76. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-63-76.

Введение

Кругломер (рис. 1) – важный элемент для контроля дефектов формы в условиях крупносерийного производства [1].

Результат сканирования детали на приборе показан в виде круглограммы на рис. 2.

В условиях импортозамещения многие приборы, такие как профилометры, кругломеры, контурографы, нуждаются в замене наиболее изнашиваемых инструментов – контактных щупов, подшипников, кронштейнов и т. д. В современных условиях по причине увеличения производственных мощностей предприятий повышается объем контролируемых деталей, и такие элементы, как контактные щупы, изнашиваются более активно, также в более активном режиме происходит износ и других механизмов. В настоящее время увеличилась и номенклатура деталей, включающая в себя множество достаточно габаритных деталей, которые необходимо измерять непосредственно в патроне станка по причине их больших массогабаритных свойств. Такие детали нельзя установить на кругломер. Поэтому более рациональным является развитие бесконтактных систем измерения, не привязанных к стационарным стойкам. В качестве эталона по центрированию будет выбран идеальный цилиндр с нулевым биением и круглостью перед настройкой прибора. Разность между эталонным значением и деталью будет вычислена программой. Это ускорит процесс центрирования/выравнивания и снизит процедуру измерения на 7–10 мин в пересчете на одну деталь. Применение одного комбинированного щупа повысило бы универсальность по работе с деталями из различных

материалов. Многие авторы подтверждают необходимость перехода к комбинированным щупам. Так, в исследовании [2] подчеркивается важность создания измерительных головок нового типа. Авторы подчеркивают необходимость гибридного датчика. Гибрид достигается в данном случае комбинацией контактного и бесконтактного методов измерения. Так, авторами [3] за счет встраивания бесконтактной измерительной головки внутрь контактной была разработана гибридная головка (рис. 3), которая состоит из контактного 1 и бесконтактного 2 (на основе низкокогерентного интерферометра) измерителей, измерительного стержня 3 со сферическим рубиновым (сапфировым) наконечником 4. Внутри последних размещены световодный элемент 5, созданный из оптически связанных прямого 6 и спирального 7 многомодовых световодов, с нанесенным внешним металлическим покрытием 8 и установленной на его торце рассеивающей микролинзой 9.

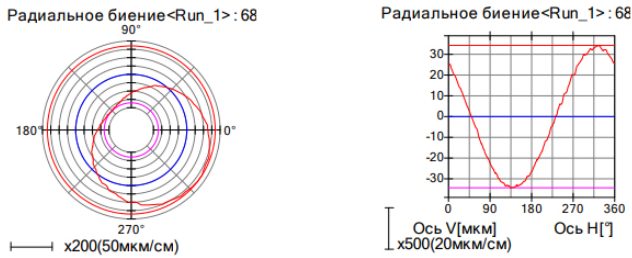
Материал и методы исследования

Вихретоковые датчики (ВД) нашли широкое применение при контроле и диагностике состояния вращающихся валов различных энергетических установок [4].

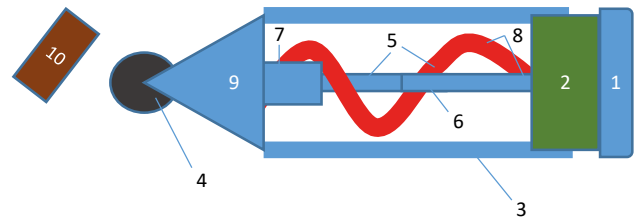
В качестве датчика в экспериментальной установке исследован датчик вихретокового типа. С этой целью были проведены измерения в Институте проблем управления сложными системами Российской академии наук на одновитковом вихретоковом преобразователе. В качестве подвижного устройства был выбран индикатор



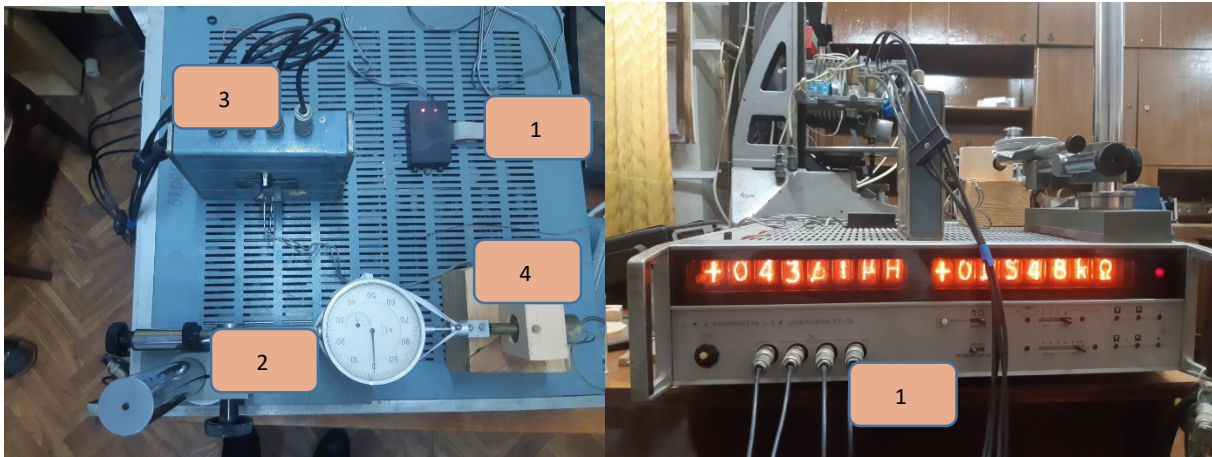
- Рис. 1. Работа на кругломере RoundTest RA-120P
- Fig. 1. Operation on the RoundTest RA-120P roundmeter



• Рис. 2. Пример круглограммы, снимаемой с контактного индуктивного датчика
 • Fig. 2. An example of a round diagram taken from a contact inductive sensor



• Рис. 3. Гибридная 3D-измерительная головка. Пояснения даны в тексте
 • Fig. 3. Hybrid 3D measuring head. Explanations are given in the text

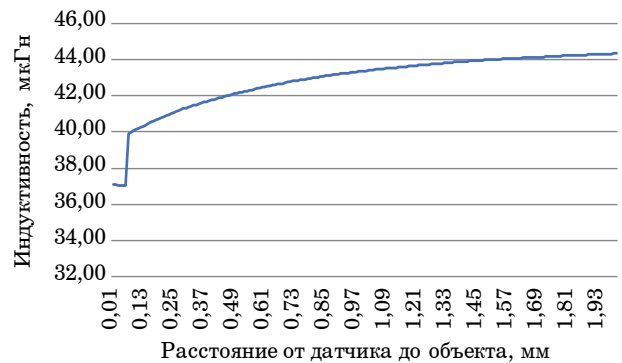


• Рис. 4. Фото установки: 1 – измеритель L, C, R E7-12; 2 – индикатор частоты; 3 – преобразователь; 4 – вихретоковый одновитковый преобразователь
 • Fig. 4. Foto of description: 1 – meter L, C, R E7-12; 2 – frequency indicator; 3 – converter; 4 – eddy current single-turn converter

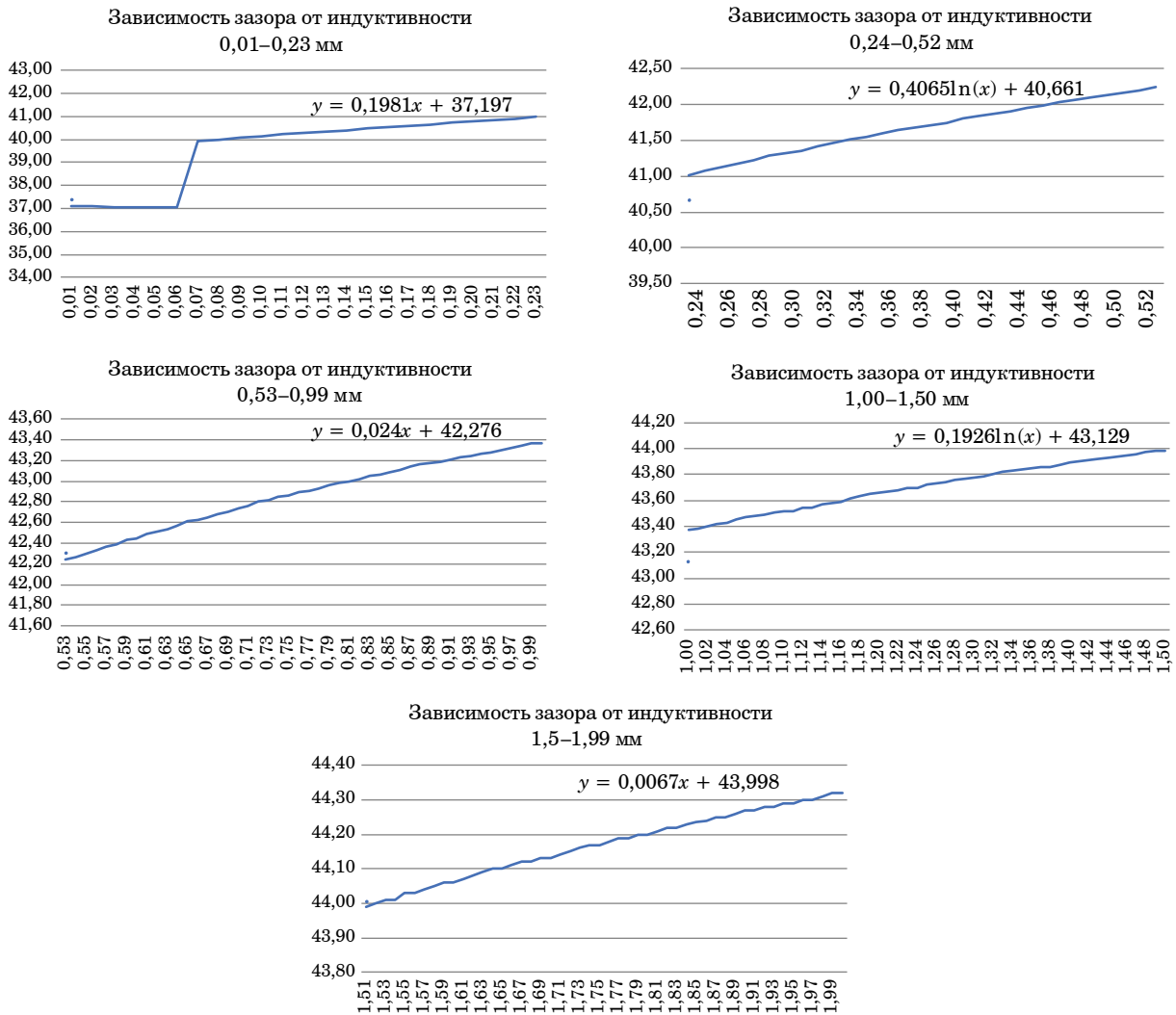
частоты, доработанный на конце пластинчатым 5 мм прямоугольным щупом (рис. 4), игравшим роль имитации детали. Задача была сведена к измерению зависимости индуктивности от смещения на микрометрическое расстояние. Это позволило увидеть зависимость смещения от индуктивности. В будущем данное графическое представление позволит четко определить зависимость при обработке сигналов на соответствующей программе. Также применение данных датчиков может быть использовано для компенсации лазерных триангуляторов, которые также могут применяться для неметаллических, но отражающих поверхностей. Идея создания мультисенсорного кругломера состоит в том, что в нем будут работать два датчика – оптического типа (для определенных материалов) и вихретокового типа (для всех металлов).

Зависимость индуктивности вихретокового датчика от зазора между ним и дюралевой деталью исследовалась на индикатор частоты (4 на рис. 4) с часовым индикатором с ценой деления 0,01 мм.

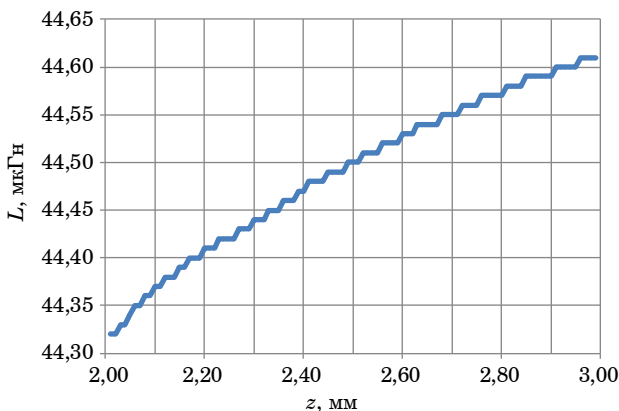
Измерения проводили цифровым измерителем L, C, R типа E7-12. Измеренное этим прибором активное входное электрическое сопротивление датчика – 0,055 кОм. Графики по исследованиям показаны на рис. 5 (первый ряд экспериментов); 6 (второй ряд экспериментов).



• Рис. 5. Результат измерения на вихретоковом датчике от 0,01 до 2 мм
 • Fig. 5. Measurement result on an eddy current sensor from 0.01 to 2 mm



• Рис. 6. Результаты измерения по периодам
 • Fig. 6. Measurement results by period



• Рис. 7. Результаты экспериментов
 • Fig. 7. Experimental results

Для лучшего понимания график был разбит на ряд подграфиков, с минимальными смещениями, которые могли бы быть интересны для соз-

дания подобного датчика в устройствах для измерения дефектов формы (рис. 6).

Далее была проведена еще серия экспериментов, уже на большем удалении от детали. Здесь шаг был уже по 0,02 мм, поэтому на графике появились характерные «ступеньки» (рис. 7).

Результаты исследования и их обсуждение

Важно сказать, что на вихретоковые преобразователи также влияет множество погрешностей, которые могут значительно ухудшать качество сигнала. Так, авторы [2] рассматривают теорию фракталов в качестве основной для выявления истинного сигнала. Индекс фрактальности реализован в виде формулы Хёрста (1), (2) [2, 4–6]:

$$D = E - H, \quad (1)$$

где D – фрактальная размерность временного ряда; E – евклидова размерность задачи; H – показатель Хёрста;

$$D = Dt + \lambda, \quad (2)$$

где D – топологическая размерность; λ – индекс фрактальности.

Для того, чтобы рассчитать показатель Хёрста временного ряда $\xi(t)$, необходимо вычислить среднее значение массива $\xi(t)$ за время:

$$\xi(t)_{\text{ср}} = \frac{1}{\tau} \sum_1^{\tau} \xi(t). \quad (3)$$

Г. Э. Хёрстом было установлено следующее соотношение:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} \approx \tau^H. \quad (4)$$

Таким образом, при обучающем эксперименте можно рассчитать фрактальную размерность и доверительный интервал для классификации дефектов.

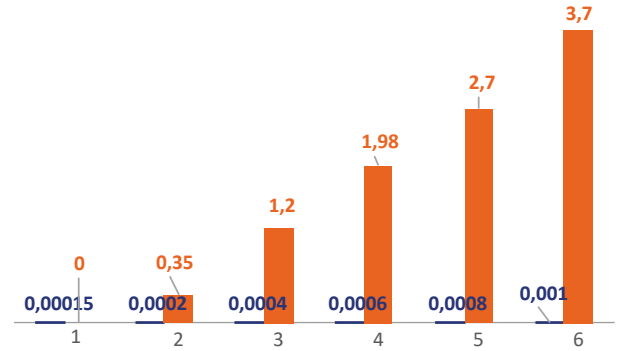
Также важным элементом работы преобразователя является магнитная проницаемость различных металлов. Так, авторами [7] были проведены исследования, которые отражены в следующем: при длительности импульса питания 0,58 мкс на выходе измерительной цепи (ИЦ) Блюмлейна, дополненной импульсным трансформатором питания, формируются напряжения с равной амплитудой при взаимодействии чувствительных элементов (ЧЭ) как с немагнитной (+0,000214 В), так и с магнитной (–0,000214 В с учетом инверсии) частицами металла (рис. 8).

Также в исследовании [7] установлено, что на немагнитные металлы вихретоковый датчик реагирует положительным графиком, выше нуля; на магнитные – наоборот, ниже нуля.

В исследовании [3] подчеркивается, что для повышения точности измерения и уменьшения температурных погрешностей при датчиках вихретокового типа дополнительно используются фильтры (рис. 9).

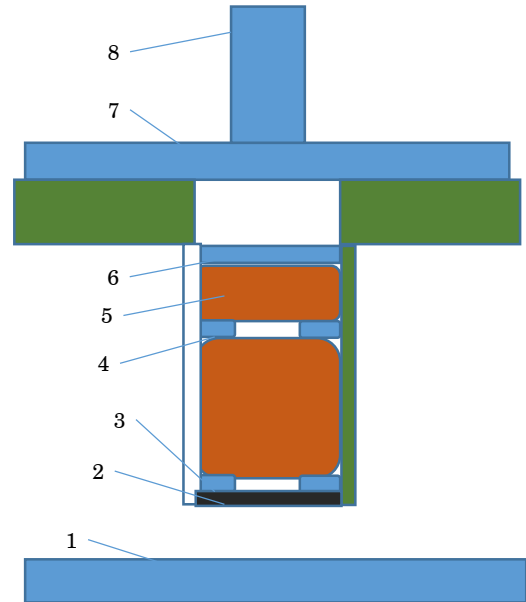
Также, наряду с вихретоковым щупом, авторами были сделаны попытки исследовать применение оптического датчика для измерения дефектов формы. Схема установки показана на рис. 10.

Приведенная оптическая схема соответствует случаю приема излучения на матричный фотоприемник. Разница во взаимном положении зеркал в плечах интерферометра приводит к изменениям положения максимумов интерференции на фотоприемнике.



• Рис. 8. Пульсации напряжения на выходе ИЦ при взаимодействии ЧЭ с немагнитными материалами диаметром 0,5 мм (синие столбцы – напряжение, В; оранжевые столбцы – время срабатывания, время реакции – мкс)

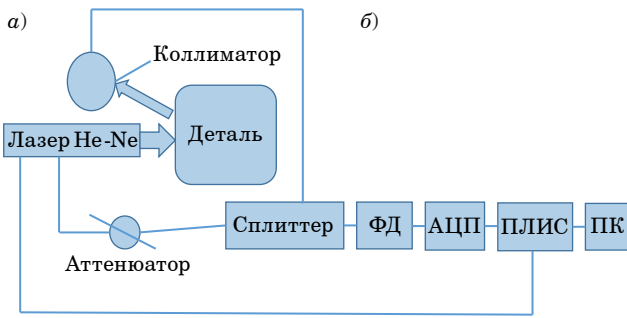
• Fig. 8. Voltage ripples at the IC output during the interaction of CE with non-magnetic materials with a diameter of 0.5 mm (blue columns – voltage, V; orange columns – reaction time of the microseconds)



• Рис. 9. Квазидифференциальная схема включения: 1 – объект; 2 – керамический корпус; 3 – измерительная катушка; 4 – компенсационная катушка; 5 – керамический каркас; 6 – экранирующая пластина; 7 – металлическая катушка; 8 – кабельная перемычка

• Fig. 9. Quasi-differential switching scheme: 1 – object; 2 – ceramic housing; 3 – measuring coil; 4 – compensation coil; 5 – ceramic frame; 6 – shielding plate; 7 – metal coil; 8 – cable jumper

В процессе физического моделирования измерительного тракта была собрана система, показанная на рис. 10. Измерительный тракт построен на основе полупроводникового лазера с длиной волны 1,54 мкм. Излучение лазера передается по одномодовому поляризованному оптоволокну. В измерительной схеме реализован интерферометр, в одно плечо которого поступает



• Рис. 10. Оптическая схема интерферометра Майкельсона (а); волоконно-оптическая схема измерительного тракта (б)
 • Fig. 10 Optical circuit of the Michelson interferometer (a); fiber-optic circuit of the measuring path (б)

опорное излучение от лазерного источника, а во второе – излучение, прошедшее измерительный тракт. Для формирования опорного сигнала использован волоконный делитель, после которого 10 % энергии лазера поступает в опорный канал, а 90 % – в канал измерений. Излучение и прием осуществляются через коллиматор. Для разделения каналов излучения и приема установлен волоконно-оптический циркулятор. Излучение с первого входа циркулятора поступает на второй канал циркулятора и передается через коллиматор в среду, а отраженное от измеряемой поверхности излучение проходит со второго на третий порт циркулятора. Далее излучение опорного и сигнального каналов смешиваются в оптическом сплиттере и поступают на вход балансного фотоприемника. На схеме использованы оптический циркулятор Thrlabs F810APC-1550 и волоконно-оптические компоненты LightComm. В качестве фотоприемника использован балансный детектор Thorlabs PDB 425C-AC.

Используемый метод измерений позволяет получать только переменную составляющую сигнала интерференции. Поэтому необходимым условием осуществления измерений является непрерывное вращение измеряемой поверхности.

При используемой длине волны лазера, 1,54 мкм, минимально возможное регистрируемое смещение составляет 385 нм. Такое смещение поверхности приводит к появлению на сигнале одной целой гармоникой. Без применения дополнительных методов обработки сигнала данное смещение можно считать порогом обнаружения. Такой уровень измерений с запасом перекрывает требования к пороговой чувствительности прибора измерения поверхности вращения. В процессе измерений подтверждено отсутствие влияния на результат измерений внешних источников света и естественного фона. Это связано с регистрацией на фотоприемнике лишь переменной состав-

ляющей светового потока, которая возникает вследствие интерференции опорного и сигнального каналов излучения.

На рис. 11, на осциллограмме, показаны осциллограммы, которые были зарегистрированы при микросмещении винта и приближении линзы к лазеру. Такие сигналы используются при анализе смещения поверхности детали, закрепленной на кругломере RoundTest.

По осциллограмме на рис. 11 было замечено, что приближение линзы к коллиматору с помощью микрометрического винта дает увеличение порогового значения осциллограммы (график красного цвета) на 190–200 мВ (смещение обозначено синей стрелкой).

Далее в лаборатории Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, где находится кругломер, был установлен лазерный датчик (рис. 12), предварительно протестированный в составе установки ООО «Бортовые аэронавигационные системы». Это было сделано для сравнения показаний измеренного значения на лазере с измеренным значением на кругломере в идеальных условиях.

Сигнал с лазерного датчика был снят с виртуального осциллографа АКПП (табл. 1).

Результаты измерения на контактном и оптическом датчике (лазере) были сведены в табл. 2.

Также важной частью работы оптического кругломера является последующая обработка круглограммы, которая позволяет вывести на экран в удобном виде полученные результаты, которые могут представлять собой визуализированную круглограмму. Для удобства сравнения методов и математических выражений несколько математических выводов по данному вопросу представлены ниже.

В исследовании представлен следующий алгоритм обработки данных [8]:

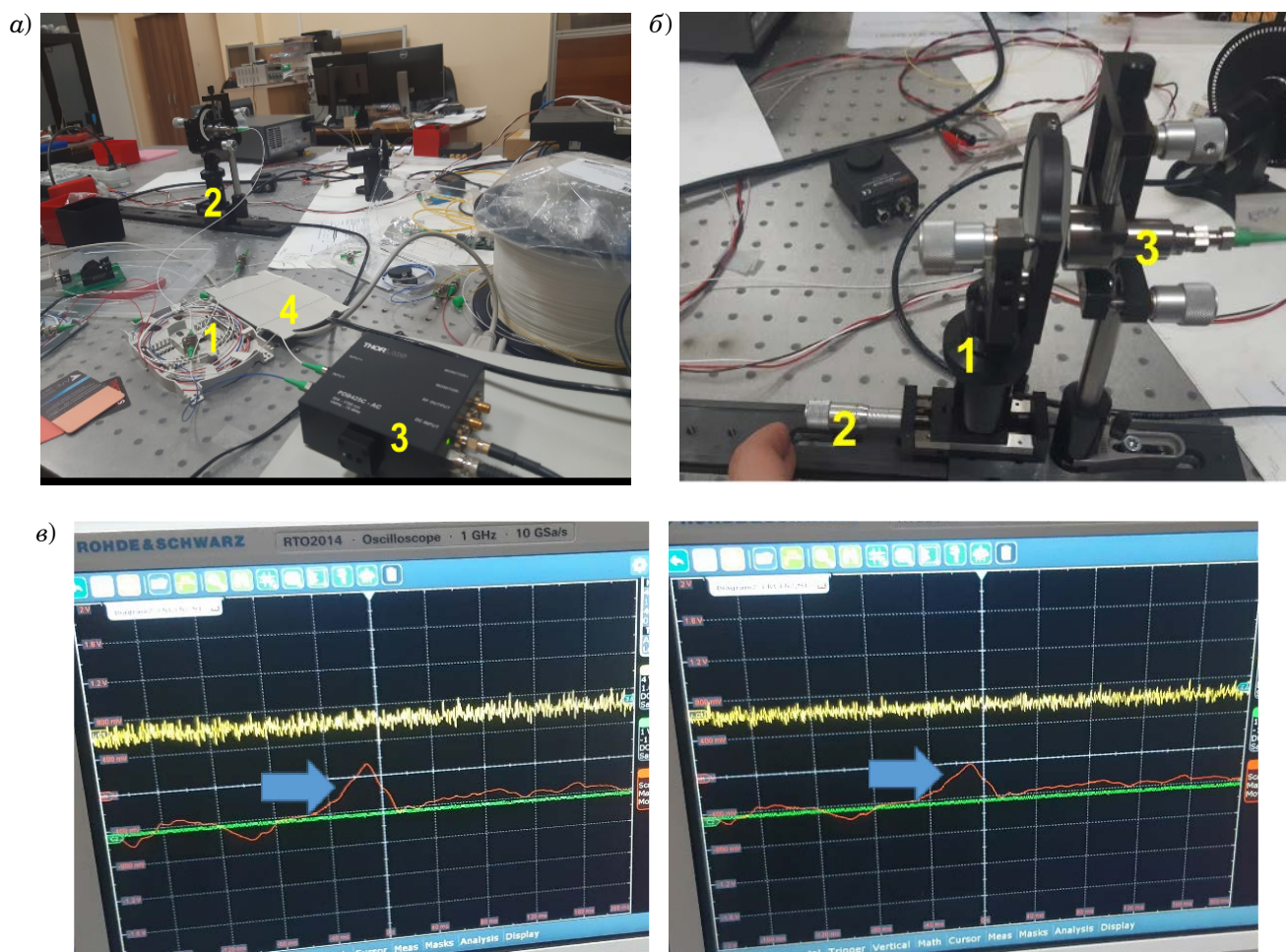
$$x_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \tag{5}$$

где n – число измеренных точек профиля изделия; x_i, y_i – декартовы координаты измеренных точек профиля изделия; r_i – радиусы измеренных точек профиля изделия.

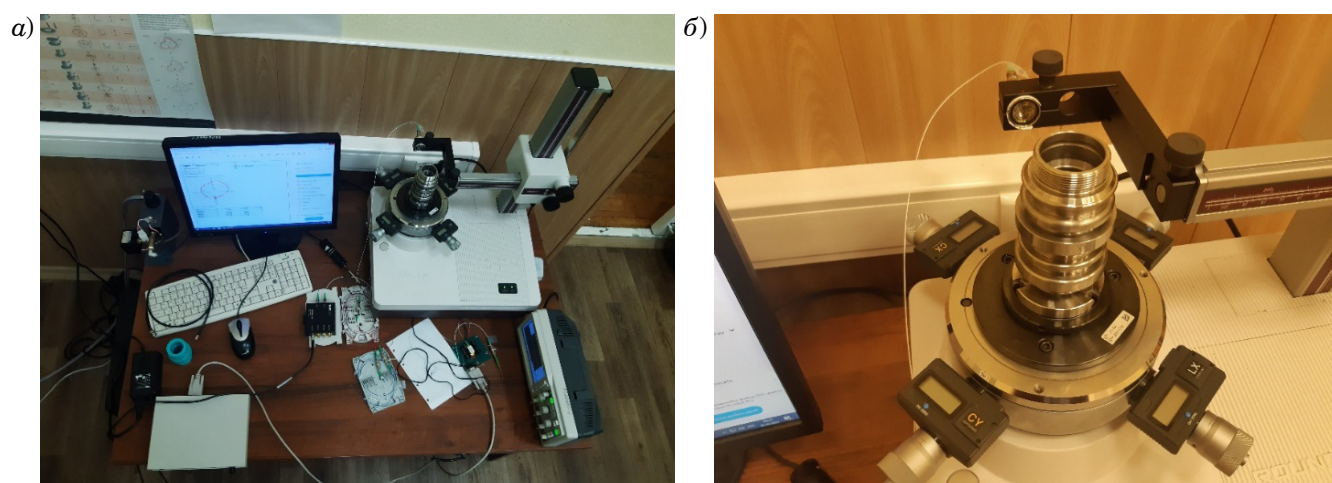
В исследовании [9] представлена формула (6):

$$G = \int_0^{2\pi} (r_i - \rho) d\varphi. \tag{6}$$

В формуле показано, что сначала определяют длину радиус-вектора эксцентриситета, а затем координаты (x, y) , при которых G_{\min} принимает наименьшее значение. Центрирование осуществляют путем отыскания координат (x, y) центра

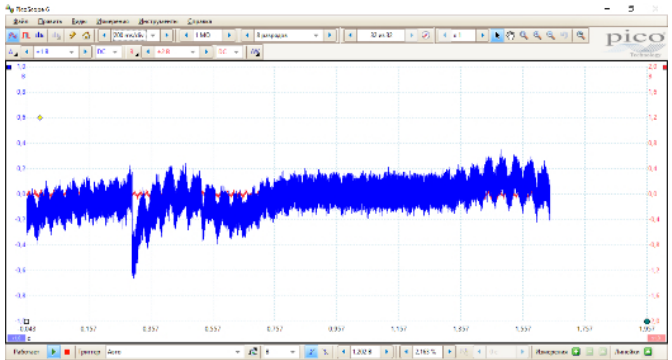
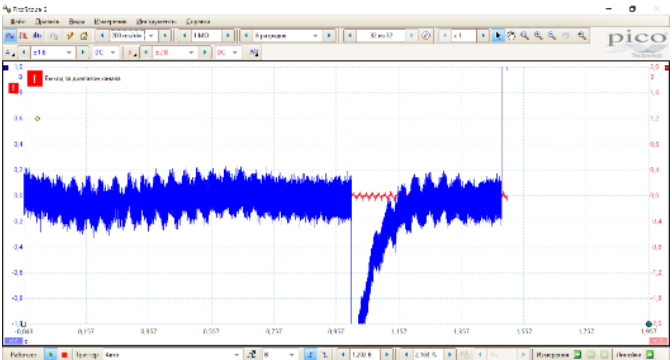
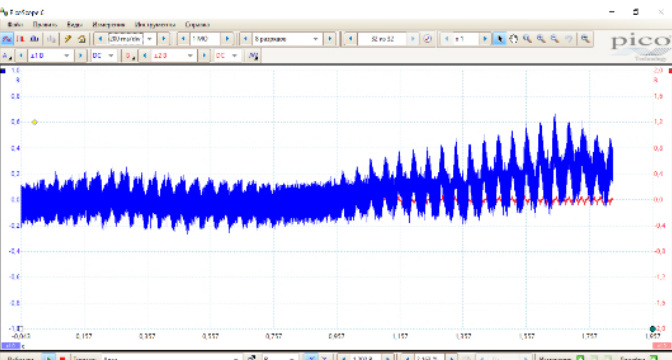
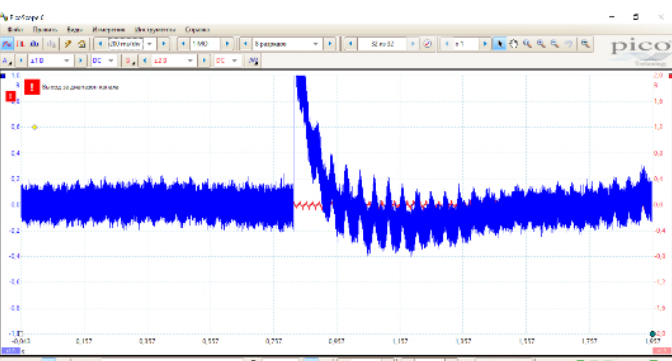


• Рис. 11. Схема установки: 1, 4 – волоконно-оптический тракт, 2 – микрометрический винт с установленным коллиматором, 3 – фотоприемник (а); 1 – стойка с отражателем, 2 – микрометрический винт, 3 – коллиматор (б); показания осциллографа Rohde and Schwarz при смещении микрометрического винта на 0,05 мкм (в)
 • Fig. 11. Installation diagram: 1, 4 – fiber optic path, 2 – micrometer screw with an installed collimator, 3 – photodetector (a); 1 – rack with reflector, 2 – micrometer screw, 3 – collimator (b); readings of the Rohde and Schwarz oscilloscope with a displacement of the micrometer screw by 0.05 μm (c)



• Рис. 12. Кругломер с лазером вместо контактного щупа (а) и собранная установка (б)
 • Fig. 12. A round meter with a laser instead of a contact probe (a) and an assembled installation (b)

- Таблица 1. Результаты измерения поворота осей на лазерной установке с помощью цифрового виртуального осциллографа АКИП 75244D
- Table 1. The results of measuring the rotation of the axes on a laser installation using the AKIP 75244D digital virtual oscilloscope

Положение детали на кругломере	Показания цифрового осциллографа
<p>CX, поворот детали на 0°</p>	
<p>CY, поворот детали на 90°</p>	
<p>LX, поворот детали на 180°</p>	
<p>LY, поворот детали на 270°</p>	

• Таблица 2. Результаты измерения на контактном и оптическом датчиках
 • Table 2. Measurement results on contact and optical sensors

Ось	Центрирование на кругломере, мм	Результаты измерения на оптическом лазерном датчике, вариация, В	Δ значений, снятых с лазерного датчика, В	Сумма по модулю данных, снятых с лазерного датчика, В
CX	-0,04	-0,6...+0,2	-0,4	0,8
CY	0,01	0,2...-0,2	0	0,4
LX	0,042	-0,2...+0,65	0,45	0,85
LY	-0,011	+1...-0,4	0,6	1,4

средней окружности из условия минимума функционала. Ниже представлен способ определения оси поперечного сечения изделия на основе максимума функционала [10]:

$$I = \int_0^{2\pi} \rho d\varphi. \quad (7)$$

В исследовании [11] цилиндр, исследуемый на кругломере, описывают тригонометрическим полиномом:

$$r = r_0 + e \cos(\varphi - \gamma) + \sum_{i=1}^p a_i \cos(i\varphi - \gamma_i), \quad (8)$$

где r_0 – радиус средней окружности; e, γ – амплитуда и начальная фаза основной гармоники; a_i, γ_i – амплитуда и начальная фаза гармоник изделия.

Выражением (8) представлен способ измерения на кругломерах с дополнительной компенсацией эксцентриситета центра средней окружности изделия и оси вращения кругломера. Вычисление происходит на основе гармонического анализа.

Отклонения круглограммы от средней окружности по параметрам:

- 1) наибольший выступ круглограммы относительно средней окружности;
- 2) наибольшая впадина круглограммы относительно средней окружности;
- 3) арифметическая сумма наибольших выступа и впадины;
- 4) среднее арифметическое модуля отклонений круглограммы от средней окружности.

Далее находят параметры среднего эллипса круглограммы, наносят этот эллипс на диаграммный диск и отсчитывают те же отклонения, что и от средней окружности. После этого записывают круглограмму концентрично относительно центра диаграммного диска, независимо от наличия эксцентриситета центра измеряемого изделия и оси вращения кругломера.

Гармонический анализ выражения проходил в исследовании [12] по формулам Бесселя и по-

казал, что отклонение r_1 основной гармоники от средней окружности изделия с высокой точностью есть смещенная на величину амплитуды e_1 гармоника второго порядка, которую определяют по зависимости

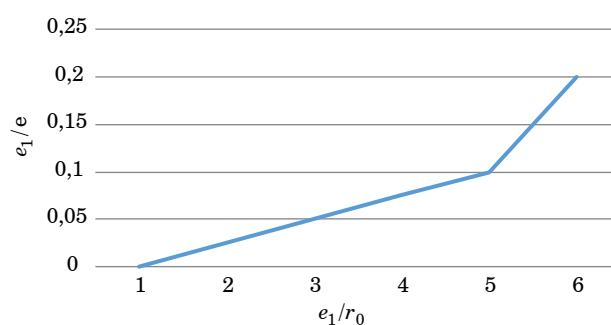
$$\Delta r_1 = e_1 [1 - \cos(2\varphi - \gamma)]. \quad (9)$$

Амплитуда второй гармоники нелинейно связана с амплитудой основной гармоники в зависимости от отношения эксцентриситета и радиуса средней окружности. Амплитуда второй гармоники нелинейно связана с амплитудой основной гармоники в зависимости от отношения эксцентриситета и радиуса средней окружности (рис. 13).

При величине эксцентриситета e в диапазоне от 0 до 0,5 r с достаточной точностью можно установить линейную зависимость между амплитудами основной и второй гармоник. Тогда амплитуду второй гармоники средней окружности изделия приближенно находят из зависимости $e_1 = 0,025e$.

Отклонение r_1 основной гармоники от средней окружности изделия находят как корректирующую поправку r как сумму основной гармоники и этого отклонения:

$$\Delta r = e \cos(\varphi_j - \gamma) + \Delta r_1, \quad (10)$$



• Рис. 13. Зависимость отношения эксцентриситета и радиуса средней окружности
 • Fig. 13. Dependence on the ratio of eccentricity and radius of the middle circle

где φ_j – полярный угол j и точки профиля детали; e , γ – амплитуда и начальная фаза основной гармоники.

Отклонение Δr_1 основной гармоники от средней окружности профиля изделия определяют по зависимости

$$\Delta r_1 = e_1 \left[l - \cos(2(\varphi_j - \gamma)) \right], \quad (11)$$

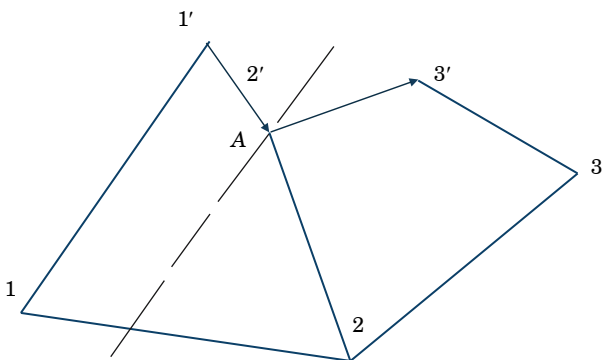
где e_1 – амплитуда второй гармоники средней окружности изделия.

На поперечном сечении детали фиксируется точка [13], и в относительно равные промежутки времени учитывается ее местоположение. Размеры траектории должны быть соизмеримы с величиной биения оси. Точки траектории стягивают в одну, а отрезки, соединяющие точки соприкосновения с деталью с соответствующими точками траектории, переводятся параллельным переносом в эту точку (рис. 14). Полученную фигуру считают изображением профиля детали. Следует отметить, что траектория движения наблюдаемой точки может оказаться произвольной кривой (незамкнутой, с самопересечениями).

На рис. 14 1–2'–3' – траектория исследуемой точки, а также равенство отрезков 2–2' и 2–1'; 3–3' и 3–1'; равенство соответствующих углов.

Используя метод наименьших квадратов, получаем для функции $f_1(N)$ следующее выражение [14]:

$$f_1(N) = C_{1H} \cdot \frac{\sin^2 \left(\frac{1}{2} a_{1H} \frac{N}{R(\chi)} \right)}{\left[\frac{1}{2} a_{1H} \frac{N}{R(\chi)} \right]^2}, \quad (12)$$



• Рис. 14. Принцип построения профиля детали по одной точке поперечного сечения. Пояснения даны в тексте

• Fig. 14. The principle of constructing the profile of a part at a single point of the cross section. Explanations are given in the text

$$f_1(N) = C_{1B} \cdot \frac{1}{1 + a_{1B}^2 \left(\frac{N}{R(\chi)} \right)^2}, \quad (13)$$

если $N = 4, 5, 6, \dots, 150$, где $C_{1H} = 1,67740 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2$; $C_{1B} = 1,7408 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^2$; $a_{1H} = 10,496 \text{ мм}$; $a_{1B} = 1,403 \text{ мм}$.

Функцию $f_2(M)$ опишем таким же выражением, как и функцию $f_1(N)$:

$$f_2(M) = C_{2H} \cdot \frac{\sin^2 \left(\frac{a_{2H} M}{2C_0 \chi_0} \right)}{\left(\frac{a_{2H} M}{2C_0 \chi_0} \right)^2}, \quad (14)$$

если $M = 1$;

$$f_2(M) = C_{2B} \cdot \frac{1}{1 + a_{2B}^2 \left(\frac{\pi M}{C_0 \chi_0} \right)^2}, \quad (15)$$

если $M = 2, 3, 4, \dots, 65$.

В условиях недостатка опытных данных и отсутствия известных нам теоретических предпосылок примем, что $a_{2H} = a_{1H}$ и $a_{2B} = a_{1B}$. Для оценки гранности в рассматриваемой задаче мы использовали результаты измерений контактным кругломером Talyrond-50, полученные на Самарском подшипниковом заводе «СПЗ-4». Измеренная высота гранности по этим результатам составила 0,13 мкм. Исходя из представления одномерного профиля спектром двумерных частот, получаем из (15) следующее соотношение:

$$\left(\sqrt{2} \cdot 0,25 H_{гр} \right)^2 = C \sum_{N=4}^{15} \left[f_1(N) \sum_{M=0}^{65} f_2(M) g(N, M) \right]. \quad (16)$$

Одна из актуальных задач при анализе формообразования и измерения представляет собой нахождение тригонометрического полинома, описывающего дискретно заданный профиль детали. В [15] используют предложенное в работе описание профиля детали тригонометрическим полиномом (17) с дополнительным введением первой гармоники, представляющей собой с определенной погрешностью искомый эксцентриситет центра средней окружности r_2 :

$$r_2(\phi) = a_0 + e \cos(\phi - \psi) + \sum_{i=2}^i a_i \cos(i\phi - \psi_i). \quad (17)$$

Если считать, что профиль детали является периодической кривой [16] синусоидальной фор-

мы, причем на окружности укладывается n периодов отклонений, то показания прибора Δ будут связаны со значением отклонения от круглости Δ_r уравнением (18):

$$\Delta = \mu_n \Delta_r, \quad (18)$$

где μ_n – коэффициент пропорциональности, называемый обычно «коэффициентом воспроизведения»,

$$\mu_n = \zeta(\alpha, \beta, n), \quad (19)$$

где α – угол, характеризующий положение измерительного наконечника прибора; β – угол призмы.

Заключение

По итогам сделанных измерений в программе PicoScore 6 (табл. 2) можно наблюдать следующие соотношения, которые необходимо соотнести с результатами центрирования/нивелирования кругломера (рис. 8), так как необходимо понимать соотношение между показаниями контактного щупа кругломера и бесконтактного датчика, внедренного нами. В программе необходимо вводить фильтры Гаусса. Соотношение микрометрического отклонения и зависимости осциллограммы имеет обратно пропорциональную зависимость по осям CX и LX , в среднем по зависимости $L = 0,1; I = Lf'$ (5).

Датчик вихретокового типа [17, 18] показал более линейную зависимость, которая была приведена на рис. 6, однако пятно контакта достаточно расплывчато, необходимо проводить дальнейшее сужение пятна, которое характеризует площадку исследуемой детали. При работе с вихретоковым датчиком необходимо исследовать апертуру сигнала для уточнения места детали, с которой будут сниматься значения. Это очень важно, чтобы датчик «смотрел» не на расплывчатую часть детали, а только на точку, диаметром не более 1 мм.

Таким образом, по результату исследований можно сказать, что сдвоенный датчик был бы интересен универсальностью к различным типам материалов, которые не могут обработать оптический и вихретоковый датчики по отдельности в силу отражающих факторов, особенностей плотности материалов и т. д., но могут измерить в совокупности, объединив свои усилия. Совмещение нескольких датчиков, отдаленных по своему принципу преобразования измерительного сигнала, наблюдается в приборах многих известных компаний. Так, несколько лет назад

компания *Fluke* выпустила прибор мультиметр-тепловизор *Fluke 279 FC*, который совмещает камеру для оценки перегрева проводов и стандартный щуповой мультиметр. Также компания выпустила прибор *Fluke 345*, который представляет собой комбинацию анализатора мощности, регистратора качества электроэнергии и токоизмерительных клещей.

Также можно сделать вывод о линейности зависимости работы датчика вихретокового типа при приближении к детали (рис. 6; 7). Вместе с тем датчик имеет ряд потенциально воздействующих погрешностей, от которых необходимо дистанцироваться путем применения ряда фильтрующих устройств, например, ряда измерительных мостов (как подчеркивалось в исследовании [7]).

Наиболее сложные системы обработки наблюдаются в исследовании [14], где рассматривается вопрос определения работы лазерного триангулятора. Здесь для работы требуется высокое качество обработки поверхности, определяемое дефектометрической природой измерений геометрических величин в этом устройстве. Так, шероховатость должна иметь параметр Ra не более 0,05 мкм. Также следует отметить чувствительность устройства к вибрации, пыли на исследуемой поверхности, световому загрязнению зоны измерений. Это вызывает необходимость более строгих требований к окружающей среде, чем для других методов, и оперативного контроля качества входного оптического сигнала. Помехи вызывают смещение положения светового пятна от отраженного от контролируемой поверхности лазерного пучка на фоточувствительной матрице, а это положение – важнейшая часть информативных параметров сигнала. Отметим, что фотографирование этого светового пятна неподвижной матрицей выполняется после каждого шага сканирования в устройстве. Полученные кадры обрабатываются один за другим. Наиболее простым путем борьбы с помехами видится контроль величины максимума в распределении плотности мощности этого сигнала в каждом кадре с последующим удалением данных, полученных с «дефектных» кадров. Найденный опытным путем критерий составляет отклонение не более 0,1 указанного максимума, полученного с фотографии светового пятна, от типичного незагрязненного освещенного лазером участка контролируемой поверхности. При дальнейшей обработке «дефектные» отсчеты могут быть замещены, например, путем линейной интерполяции.

Лазерный датчик на основе волоконно-оптического интерферометра Майкельсона имеет ряд особенностей, которые можно объяснить неоднозначностью функции преобразования, свой-

ственной интерферометрам. Чаще всего от этого отстраиваются, используя компенсационный метод, когда оперативно вносится изменение оптической длины в одно из плеч интерферометра. При этом система на основе обратной связи непрерывно поддерживает сигнал на постоянном уровне. Тогда сигналом служит это предварительно отградуированное изменение оптической длины. Следует отметить свойственные оптиче-

ским методам помехи от вибрации и загрязнений исследуемой поверхности.

Достоинством является высокая чувствительность описанных выше оптических датчиков, для наиболее распространенных приборов находящаяся в пределах от 0,05 до 0,1 длины волны используемого лазера. Это более чем достаточно для контроля биений вращающихся механических узлов, например, в станках.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Гущина Е. А., Епифанцев К. В., Ефремов Н. Ю.* Цифровая метрология: учеб.-метод. пособие. СПб.: ГУАП, 2022. 104 с.
2. Гибридная 3D-измерительная головка для высокоточных контактных и бесконтактных координатных измерений размеров изделий ракетно-космической промышленности / Е. В. Леун [и др.] // *Контенант*. 2018. Т. 17, № 1. С. 134–144.
3. *Иудин Д. И., Копосов Е. В.* Фракталы: от простого к сложному / Нижегород. гос. арх.-строит. ун-т. Н. Новгород: ННГАСУ, 2012. 200 с.
4. *Абрамов С. В.* Повышение информативной способности вихретоковых датчиков с различной магнитной проницаемостью // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2014. № 4 (10). С. 76–81.
5. *Мухаметзянов И. З., Майский Р. А., Янтудин М. Н.* Методические особенности применения стохастических показателей при анализе потоковых данных природных или технических процессов и объектов // *Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн.* 2015. № 5. С. 446–492.
6. *Латыпова Н. В.* Компьютерная обработка данных. Фракталы: учеб. пособие. Ижевск: Удмурт. ун-т, 2012. 78 с.
7. *Боровик С. Ю., Коршиков И. Г., Секисов И. Н.* Выбор параметров импульсного питания одновиткового вихретокового датчика для обеспечения близкой чувствительности к частицам металла // *Sensors & systems*. 2021. № 3. С. 56–62.
8. *Spragg R. C.* Accurate calibration of surface texture and roundness measuring instruments // *Proc. instr. mech. engrs.*, 1967–1968. Vol. II, № 12. P. 32.
9. British Standard 3770:1964. Methods for the assessment of departures from roundness. URL: BS 3730 – Assessment of departures from roundness (bsigroup.com) (дата обращения: 10.01.2024).
10. *Немировский А. С.* Центр и направление оси несимметричных сечений и их определение по круглограмме // *Измерительная техника*. 1971. № 11. С. 22–26.
11. *Авдулов А. Н.* Контроль и оценка круглости деталей машин. М.: Изд-во стандартов, 1974. С.125).
12. Патент на изобретение. Способ измерения поверхностей вращения на кругломере / Захаров О. В. (RU), Кочетков А. В. (RU), Погораздов В. В. (RU). Заявка 2003138215/28. 31.12.2003.
13. *Чеканина Е. А.* Исследование возможности использования точки профиля поперечного сечения детали типа тело вращения в качестве измерительной базы // *МИКМУС – 2014: XXVI Междунар.я инновационно-ориентированная конф. молодых ученых и студ.: тр. конф. / Российская Академия наук; РФФИ; Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления; Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова РАН*. 2015. С. 63–65.
14. *Заякин О. А.* Математическая модель поверхности, контролируемой экспериментальным лазерным кругломером // *Известия Самар. науч. центра РАН*. 2015. Т. 17, № 2–5. С. 978–984.
15. *Бржозовский Б. М., Бровкова М. Б., Захаров О. В.* Гармонический анализ в исследовании процессов формообразования и измерения прецизионных деталей // *Вестн. Саратов. гос. техн. ун-та*. 2004. № 1 (2). С. 46–53.
16. *Гельбель И. Д., Тимофеев Б. П., Млокосевич С. Ю.* Измерение некруглости валов // *Науч.-техн. вестн. С.-петерб. гос. ин-та точной механики и оптики (техн. ун-та)*. 2003. № 9. С. 154–158.
17. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / под ред. Ю. Н. Секисова, О. П. Скобелева. Самара: Самарский НЦ РАН, 2001. 188 с.
18. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / под общ. ред. О. П. Скобелева. М.: Машиностроение, 2011. 298 с.

REFERENCES

1. Gushchina E. A., Epifantsev K. V., Efremov N. Yu. Digital metrology: textbook. SPb.: SUAI; 2022. 104 p. (In Russ.).
2. Leun E. V., Sysoev V. K., Shalai V. V., Belovolov M. I., Kurlov V. N., Volkov P. V., Shulepov A. V. Hybrid 3D measuring head for high-precision contact and non-contact coordinate measurements of the dimensions of rocket and space industry products. *Content*. 2018;17(1):134–144. (In Russ.).
3. Yudin D. I., Koposov E. V. Fractals: from simple to complex; Nizhny Novgorod State Arch. Building. N. Novgorod: NNGASU; 2012. 200 p. (In Russ.).
4. Abramov S. V. Increasing the informative ability of eddy current sensors with different magnetic permeability. *Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2014;4(10):76–81. (In Russ.).
5. Mukhametzhanov I. Z., Maisky R. A., Yantudin M. N. Methodological features of the application of stochastic indicators in the analysis of streaming data of natural or technical processes and objects. *Oil and gas business: electronic scientific journal*. 2015;(5):446–492. (In Russ.).
6. Latypova N. V. Computer data processing. Fractals: studies. stipend. Izhevsk: Udmurt University; 2012. 78 p. (In Russ.).
7. Borovik S. Yu., Korshikov I. G., Sekisov I. N. Selection of parameters for pulsed power supply of a single-turn eddy current sensor to ensure close sensitivity to metal particles. *Sensors & systems*. 2021;(3):56–62. (In Russ.).
8. Spragg R. C. Accurate calibration of surface texture and roundness measuring instruments. *Proc. instr. mech. engrs.*, 1967–1968, vol. II, no. № 12, pp. 32.
9. British Standard 3770:1964. Methods for the assessment of departures from roundness. Available from: BS 3730 – Assessment of departures from roundness (bsigroup.com) [Accessed 10 January 2024].
10. Nemirovskiy A. S. The center and direction of the axis of asymmetric sections and their definition by a round diagram. *Measuring technique*. 1971;(11):22–26. (In Russ.).
11. Avdulov A. N. Control and evaluation of the roundness of machine parts. Moscow: Publishing House of Standards; 1974. 125 p. (In Russ.).
12. Patent for the invention of a method for measuring surfaces of rotation on a round meter; Zakharov O. V. (RU), Kochetkov A. V. (RU), Pogorazdov V. V. 2003138215/28. 12/31/2003. (In Russ.).
13. Chekanina E. A. Investigation of the possibility of using the cross-sectional profile point of a part of the type of body of rotation as a measuring base. MICMUS – 2014: XXVI International innovation-oriented conference of young scientists and students. Proceedings of the conference; Russian Academy of Sciences; RFBR; Department of Energy, Mechanical Engineering, Mechanics and Control Processes; A. A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences. 2015, pp. 63–65. (In Russ.).
14. Zayakin O. A. Mathematical model of a surface controlled by an experimental laser round meter. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2015;17(2–5):978–984. (In Russ.).
15. Brzhozovsky B. M., Brovkova M. B., Zakharov O. V. Harmonic analysis in the study of shaping processes and measurement of precision parts. *Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2004;(1(2)):46–53. (In Russ.).
16. Gebel I. D., Timofeev B. P., Mlokosevich S. Y. Measurement of non-roundness of shafts. *Scientific and technical bulletin of the St. Petersburg State Institute of Precision Mechanics and Optics (Technical University)*. 2003;(9):154–158. (In Russ.).
17. Methods and means of measuring multidimensional displacements of power plant elements; eds. by Yu. N. Sekisov, O. P. Skobelev. Samara: Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 2001. 188 p. (In Russ.).
18. Cluster methods and means of measuring stator deformations and coordinates of displacements of blade and blade ends in gas turbine engines / eds by O. P. Skobelev. Moscow: Mashinostroenie; 2011. 298 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Епифанцев Кирилл Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – разработка отечественных приборов для измерения дефектов формы, контура, шероховатости.

Epifancev Kirill V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Metrological Support of Innovative Technologies and Industrial Safety, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – the development of high-quality devices for measuring defects in shape, contour, and roughness.

Петров Глеб Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – лазерные технологии, исследование лидарных систем, цифровая обработка данных.

Белопухов Валентин Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем управления сложными системами Российской академии наук.

Область научных интересов – цифровая обработка сигналов, микропроцессорные системы.

Заякин Олег Александрович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института проблем управления сложными системами Российской академии наук.

Область научных интересов – оптические методы для измерений геометрических величин, когерентная оптика, вихретоковые методы измерений геометрии.

Поступила в редакцию 06.01.2024

Поступила после рецензирования 11.01.2024

Принята к публикации 29.01.2024

Petrov Gleb A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Tools the Department, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – laser technologies, lidar systems research, digital data processing.

Belopukhov Valentin N., PhD in Technical Sciences, Senior Researcher at the Institute of Complex Systems Management Problems of the Russian Academy of Sciences.

Research interests – digital signal processing, microprocessor systems.

Zayakin Oleg A., PhD in Technical Sciences, Researcher Assistant at the Institute of Complex Systems Management Problems of the Russian Academy of Sciences.

Research interests – optical methods for measuring geometric quantities, coherent optics, eddy current methods for measuring geometry.

Received 06.01.2024

Revised 11.01.2024

Accepted 29.01.2024

Сетевые калькуляторы на основе временных автоматов для оценки характеристик вычислительных сетей с возможностью динамической реконфигурации

Елена Александровна Суворова¹

✉ wildcat15@yandex.ru, orcid.org/0000-0001-6330-8182, SPIN-код: 4026-4290

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Многие вычислительные сети должны обеспечивать одновременную передачу большого количества потоков данных, для каждого из которых должны обеспечиваться различные параметры качества сервиса, изоляция от других потоков данных. Для обозначения этого класса сетей в настоящее время часто используется термин «сети, чувствительные ко времени» (Time Sensitive Networks, TSN). Количество передаваемых потоков данных, пути их передачи, необходимые параметры потоков, требуемые характеристики могут меняться во времени вследствие изменения режимов функционирования системы, наборов решаемых задач, фаз вычислительного процесса, структуры сети (штатно или в результате отказов оборудования). Для оценки характеристик вычислительных сетей, прежде всего максимального времени доставки данных, чаще всего используются сетевые калькуляторы на базе (min, +)- или (max, +)-алгебр. Однако существует ряд серьезных ограничений при использовании таких сетевых калькуляторов для данного класса сетей. В данной статье мы рассматриваем возможности по формированию сетевых калькуляторов на основе временных автоматов для данного класса систем, показываем преимущества этого подхода.

Ключевые слова: сетевые калькуляторы, временные автоматы, локальные вычислительные сети, механизмы обеспечения качества сервиса, динамическая реконфигурация, SpaceFibre

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Для цитирования: Суворова Е. А. Сетевые калькуляторы на основе временных автоматов для оценки характеристик вычислительных сетей с возможностью динамической реконфигурации // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 1. С. 77–88. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-77-88.

Original article

Network calculus based on timed automata for the characteristics evaluation of computer networks with the dynamic reconfiguration

Elena A. Suvorova¹

✉ wildcat15@yandex.ru, orcid.org/0000-0001-6330-8182, SPIN-code: 4026-4290

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Many computer networks must provide simultaneous transmission of a large number of data flows (streams), for each of which different quality of service parameters and isolation from other data streams must be provided. The number of transmitted data streams, their transmission paths, parameters, required characteristics can change over time due to changes in system operating modes, sets of tasks to be solved, phases of the computation process, network structure (planned or as a result of terminal nodes and routers failures). Network calculators based on (min, +) or (max, +) algebras are most often used to evaluate the characteristics of computer networks, primarily the maximum data delivery time. However, there are a number of serious limitations when using such network calculators for this class of networks. In this article, we consider the possibilities of creating network calculators based on timed automata for this class of systems, and show the advantages of this approach.

Keywords: network calculus, timed automata, local area networks, quality of service mechanisms, dynamic reconfiguration, SpaceFibre

Acknowledgements. The paper was prepared with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant agreement no. FSRF-2023-0003 “Fundamental principles of building of noise-immune systems for space and satellite communications, relative navigation, technical vision and aerospace monitoring”.

For citation: Suvorova E. A. Network calculus based on timed automata for the characteristics evaluation of computer networks with the dynamic reconfiguration. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2024;3(1):77–88. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-77-88.

Введение

Многие современные сети должны обеспечивать передачу большого количества потоков данных в условиях требований реального времени (для разных потоков требования могут существенно различаться), изоляцию потоков данных. Для обозначения сетей с такими требованиями появился термин «сети, чувствительные ко времени» (Time Sensitive Networks, TSN) [1–11]. Для таких сетей, как правило, характерны необходимость поддержки различных механизмов качества сервиса (QoS), наличие механизмов парирования отказов, механизмов обеспечения живучести, механизмов адаптации к штатным изменениям структуры сети и характеристик потоков данных за счет динамической реконфигурации [1–11].

Оценка временных характеристик, в особенности максимального времени доставки данных, для таких сетей в целом, а также маршрутизаторов (коммутаторов) как элементной базы для их формирования является важнейшей задачей. Однако точная оценка времени, как правило, имеет очень большую вычислительную сложность. Во многих случаях вычислительная сложность оказывается неприемлемой. Использование же методов с меньшей вычислительной сложностью приводит к получению сильно завышенных характеристик. Наряду с задачей оценки временных характеристик, для таких систем актуальны также задача сравнения характеристик модели системного уровня (аналитической модели) и модели уровня регистровых передач (Register Transfer Level, RTL). Это может использоваться для проверки того, насколько RTL-модель соответствует исходной системной модели или насколько системная модель соответствует RTL-модели (последнее может использоваться, например, в тех случаях, когда стало понятно, что в RTL-модели исходные характеристики не достижимы и системную модель необходимо аннотировать теми характеристиками, которые достижимы для RTL-модели) [2, 4, 7, 8, 11].

В настоящее время для оценки максимального времени наиболее часто используется математический аппарат сетевых калькуляторов, основанных на (min, +)- или (max, +)-алгебрах. (Как правило, (max, +) используются для систем с обратными связями, например, моделей протокола TCP/IP). Однако он имеет ряд ограничений, существенных для анализа рассматриваемого класса сетей [2, 4, 7, 8, 12–14].

Далее мы рассмотрим основные возможности и ограничения сетевых калькуляторов. Для устранения этих ограничений мы предлагаем подход,

в котором сетевой калькулятор формируется на базе математического аппарата временных автоматов с возможностью динамической реконфигурации. Также будут показаны возможности применения этого подхода на примерах.

Краткая информация о математическом аппарате сетевых калькуляторов, его возможностях и ограничениях

При использовании математического аппарата сетевых калькуляторов обслуживающему прибору (сети из нескольких обслуживающих приборов) ставятся в соответствие кривая поступления заявок (arrival curve) и кривая обслуживания (service curve) [15–17]. Форма кривой поступления заявок определяется в соответствии с тем, как заявки поступают в систему. Будем обозначать функцию, соответствующую этой кривой, $A(t)$. Форма кривой обслуживания определяется в соответствии со свойствами обслуживающего прибора – того, какое время ему требуется на обслуживание заявок. Будем обозначать функцию, соответствующую этой кривой, $As(t)$. Функции $A(t)$ и $As(t)$ являются неубывающими. В каждый момент времени t_i выполняется условие:

$$A(t) \geq As(t). \quad (1)$$

Функция $B(t)$ используется для определения количества заявок, которое находится в обслуживающем приборе в каждый момент времени:

$$B(t) = A(t) - As(t). \quad (2)$$

Сетевые калькуляторы могут использоваться для оценки количества заявок, поступивших в систему на интервале времени $[s, t]$, обслуженных в течение этого интервала времени, находящихся на обслуживании в течение этого интервала времени:

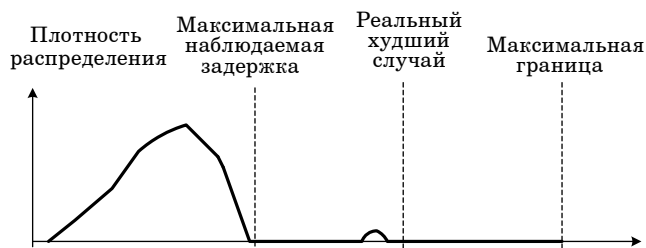
$$\forall s, 0 \leq s \leq t;$$

$$A(s, t) = A(t) - A(s);$$

$$As(s, t) = As(t) - As(s). \quad (3)$$

На рисунке [18–21] приведена классификация используемых граничных значений времени, и показаны зоны расположения фактических максимальных значений времени в ходе функционирования реальных систем.

Большая часть происходящих событий сконцентрирована в зоне, ограниченной максимальной наблюдаемой задержкой (Maximal observed delay). Редко наблюдаемые события расположе-



- Классификация используемых граничных значений времени
- Classification of time limits used

ны в зоне, ограниченной задержкой, называемой «реальный худший случай» (Actual worst case). И, наконец, события, почти никогда не возникающие в рассматриваемой системе, ограничены максимальной верхней границей (Upper bound), за пределами этой границы событий точно быть не может [18–21].

Современные сетевые калькуляторы делятся на детерминированные и стохастические. Детерминированные сетевые калькуляторы позволяют получать оценку верхней границы времени, которая точно не может быть превышена в ходе функционирования моделируемой системы (Upper bound). Однако такая верхняя граница зачастую оказывается довольно существенно завышенной, по сравнению с максимальными значениями, реально достигаемыми в ходе функционирования [18–21].

Стохастические сетевые калькуляторы позволяют получать оценку верхней границы, которая не будет превышена с некоторой вероятностью. Они могут быть ориентированы на границу Maximal observed delay или Actual worst case. (Эта верхняя граница, как правило, оказывается существенно ближе к максимальным значениям, достигаемым в ходе функционирования [18–21]).

Если для системы заданы требования жесткого реального времени, то, как правило, используются детерминированные сетевые калькуляторы [18–21].

В большинстве сетевых калькуляторов используются кривые поступления заявок, соответствующие моделям трафика «дырявого ведра» (leaky-bucket), «маркерного ведра» (token-bucket), и кривые обслуживания, основанные на предположении о константном максимальном времени обслуживания заявки (rate-latency curves). Данные модели были сформулированы на основе исследования трафика в реальных сетях, прежде всего, в сетях на базе стандарта Ethernet [18–24].

Модель «дырявого ведра» соответствует схемам обмена, в которых при переполнении буферов транзитного сетевого оборудования трафик начинает отбрасываться [18–24].

Модель «маркерного ведра» представляет собой более гибкий вариант, чем модель «дырявого ведра». Однако и она также соответствует схемам передачи, в которых возможны переполнения транзитных буферов с последующим отбрасыванием трафика. (Эта модель позволяет описать трафик, характеризующийся некоторой скоростью поступления заявок, с учетом того, что заявки потенциально могут группироваться [18–24]).

Кривая обслуживания, как правило, характеризуется двумя коэффициентами – скоростью обслуживания (R) и максимальным временем обслуживания [18–24]:

$$\begin{aligned} t > T : A_s(t) &= R(t - T); \\ t \leq T : A_s(t) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Однако эти модели входных потоков, модели обслуживания, представляют собой потоки трафика в упрощенном виде. Можно говорить, что они являются компромиссным представлением, обеспечивающим приемлемую вычислительную сложность при анализе трафика [18–21].

При использовании детерминированных сетевых калькуляторов значения коэффициентов, используемые в моделях, являются константами. Например, при использовании модели «маркерного ведра» значения коэффициентов, характеризующих скорость поступления заявок (p), и то, что они могут группироваться (q), являются константами. (Чем больше значение коэффициента q , тем больше вероятность, что заявки будут поступать группами). В этом случае количество заявок, поступившее в систему в течение интервала времени $[s, t]$, может быть определено следующим образом [21–24]:

$$\begin{aligned} 0 \leq s \leq t; \\ A(s, t) \leq p(t - s) + q. \end{aligned} \quad (5)$$

Если в разные моменты времени коэффициенты могут принимать различные значения, то ось времени может быть разделена на несколько интервалов, для каждого из которых выполняются отдельные оценки с соответствующими значениями коэффициентов. Как правило, такой подход используется, если коэффициенты изменяются относительно нечасто [21–24].

Если же происходят частые изменения коэффициентов, то при использовании такого подхода вычислительная сложность может оказаться неприемлемой. Поэтому для выполнения оценок выбираются максимальные значения коэффициентов p и q . Однако это влечет за собой заведомо завышенную оценку максимального времени обслуживания [21–24].

При использовании стохастических сетевых калькуляторов вместо константных значений используются функции $P(T)$ и $Q(T)$. Точность получаемой оценки при этом сильно зависит от выбора этих функций. Отметим, что при использовании этого подхода вычислительная сложность также оказывается достаточно большой, и она сильно зависит от вида этих функций [21–24].

Отметим, что при использовании таких моделей потоков предполагается, что заявки обслуживаются в порядке их поступления. Другие дисциплины обслуживания (например, последним пришел, первым обслуживается (LIFO); первой обслуживается заявка, для которой осталось наименьшее время до дедлайна (Earliest Deadline First); разные уровни приоритетов заявок) в явном виде специфицировать весьма проблематично [21–24].

Для того, чтобы устранить такого рода проблемы, в пределах сетевых калькуляторов могут быть определены новые серверы – новые кривые обслуживания. Например, так было сделано для исследования характеристик *Cyclic Queuing and Forwarding (CQF)* [25–29]. Однако в классическом CQF используется всего две очереди, в стандартах типа *SpaceFibre*, *Serial Rapid IO*, *Infiniband* очередей может быть значительно больше: от четырех-восьми до нескольких десятков. Порядок определения приоритетов передачи между ними может быть существенно сложнее, чем используемый в CQF. Функция, соответствующая кривой обслуживания, в случаях, если в системе поддерживаются различные типы транзакций или виртуальные каналы (линии), для которых определены разные параметры качества сервиса, разные правила обслуживания, может быть очень сложной (большая вычислительная сложность). Поэтому применение подхода, использованного для CQF, в таких случаях приведет к очень большой вычислительной сложности. Отметим, однако, что как раз такие схемы поведения наиболее рационально специфицировать с использованием временных автоматов (краткая информация об этом математическом аппарате приведена в следующем подразделе).

Если система включает в себя обратные связи (например, управление потоком от приемника), то сформировать для нее кривую обслуживания очень сложно. Как правило, в таких случаях для оценки характеристик путь передачи данных рассматривается от приемника к источнику (в обратном порядке по отношению к процессу передачи данных). Это также несколько увеличивает сложность вычислений и может приводить к завышению получаемых оценок [25–29].

Еще сложнее исследовать с помощью классических сетевых калькуляторов системы с возможностью динамической реконфигурации – системы, характеристики которых (скорость обслуживания транзакций, другие параметры) могут меняться со временем [26–29]. Как было отмечено выше, потенциально эти изменения могут происходить, например, вследствие отказов в исследуемой системе, приводящих к частичной деградации ее характеристик, или вследствие адаптации системы к изменениям потоков данных (выделение большего количества ресурсов потоку данных, который в текущий период времени имеет большую интенсивность). Если поведение системы может меняться динамически, то каждому варианту поведения необходимо ставить в соответствие отдельную кривую обслуживания. При этом оценка поведения системы в переходном процессе становится практически не возможной. Это происходит вследствие скачкообразных переходов от одной кривой обслуживания к другой [26–29].

Отметим также, что сетевые калькуляторы не обеспечивают возможности автоматического сопоставления результатов модели системного уровня и RTL-модели [26–29].

Устранить эти недостатки можно, если сочетать сетевые калькуляторы и временные автоматы. В настоящее время существует ряд исследований, в которых сетевые калькуляторы используются в сочетании с временными автоматами [30, 31]. Кривые обслуживания, получаемые в сетевых калькуляторах, соответствующим образом интерпретируются и подаются в качестве входных последовательностей событий на временные автоматы. И наоборот: выходные последовательности событий с временных автоматов подаются после предварительной обработки в качестве кривых поступления заявок на сетевые калькуляторы. При этом временные автоматы, как правило, используются в качестве источников и приемников транзакций в системе. Они не заменяют собой обслуживающие приборы, для оценки характеристик которых по-прежнему используются кривые обслуживания и $(\min, +)$ - или $(\max, +)$ -алгебры. Кроме того, преобразования потоков последовательностей событий между моделями сетевых калькуляторов и временными автоматами достаточно сложно организовать. Возможность этого очень сильно зависит от особенностей используемого инструментария. Существующий инструментарий в основном является зарубежным и в настоящее время недоступен в исходных кодах. Это существенно ограничивает возможности по внесению в него необходимых модификаций.

Краткая информация о временных автоматах

Временные автоматы (timed automata) являются развитием конечных автоматов, ориентированным на исследование поведения систем с требованиями реального времени. Наиболее часто временные автоматы используются для оценки достижимости/недостижимости локаций и оценки времени выполнения системой некоторых действий. Отметим, что по своим возможностям временные автоматы сравнимы с темпоральными логиками, однако форма представления системы к временного автомата (сети из нескольких временных автоматов) упрощает процесс сравнения этой системной модели, например, с моделью уровня регистровых передач (Register Transfer Level, RTL) [32].

Временные автоматы включают в себя понятие переменных – часов или таймеров (clock) [32, 33], обеспечивающих возможность оценки поведения системы в реальном времени. В процессе функционирования автомата данные переменные могут инкрементироваться (инкремент выполняется каждую единицу модельного времени одновременно для всех переменных) или сбрасываться. Условия сброса для каждого часа могут быть определены по-разному. Это позволяет использовать их для измерения различных периодов времени в модели. Также во временном автомате могут использоваться переменные других типов для выполнения различных оценок, например, в качестве счетчиков различных событий.

Для временных автоматов определено понятие «локация» (Location). Одна локация может включать в себя несколько состояний временного автомата, в которых часы и другие переменные могут принимать различные значения, но поведение моделируемой системы при этом одинаково. Для каждой локации могут быть заданы инварианты – условия, при которых временной автомат может находиться в данной локации. Для каждой локации может быть определено один или несколько переходов в другие локации. Для каждого перехода могут быть определены условия срабатывания и действия, выполняемые при срабатывании. В частности, с переходами может быть связан сброс часов [32–34].

Математический аппарат временных автоматов постепенно развивался в соответствии с развитием исследуемых систем. Для моделирования сложных/составных систем была добавлена возможность формирования сетей из нескольких параллельно функционирующих автоматов. Взаимодействие между ними осуществляется за счет использования каналов, по которым могут

передаваться события и глобальных переменных, которые доступны для всех автоматов сети [35, 36].

Большинство современных вычислительных систем обладают возможностями по статической (на этапе разработки) или динамической (в процессе функционирования) реконфигурации структуры и поведения (правил функционирования).

Для моделирования таких систем в математический аппарат временных автоматов тоже были добавлены возможности по статической и динамической реконфигурации. Многие из этих возможностей основаны на использовании параметров (или переменных). Параметры (или переменные) могут использоваться в инвариантах и условиях переходов. Например, параметрически могут задаваться размер буферов, значение времен таймаутов. Также в ряде случаев существует возможность изменять действия, связанные с переходами [35–39].

Параметры (или переменные) могут использоваться в качестве предикатов в условиях переходов или инвариантах. В результате при изменении значений этих предикатов можно изменять наборы используемых условий выполнения тех или иных действий. В частности, можно в ходе исследования характеристик системы отключать (и, при необходимости, через некоторое время включать снова) переходы. Это может быть сделано благодаря установке предикатов в значения, константно блокирующих возможность срабатывания условий переходов. Таким образом, возможно динамическое изменение графа связей между локациями.

Для исследования/оценки характеристик временных автоматов формируются траектории – последовательности переходов между локациями, аннотированные временем, когда они осуществляются. Зачастую для временного автомата не существует возможности построить все возможные траектории. Для таких временных автоматов, соответственно, не будет представляться возможным верифицировать свойства типа «локация никогда не будет достигнута» и т. п. Однако для систем реального времени, как правило, требуется проверить, произойдет (или не произойдет) ли некоторое событие не в бесконечном времени, а в течение некоторого заданного интервала времени. В других случаях может существовать максимальное время, в течение которого некоторая последовательность действий должна быть выполнена (например, должна быть решена задача). Если эта последовательность действий выполнена не будет, то для системы становится уже не важным, когда именно она завершится. Для этого интервала времени потенциально могут быть сформированы

все возможные фрагменты траекторий (ему соответствующие). Таким образом могут быть определены достижимость локаций, срабатывание переходов, время выполнения действий.

Предлагаемый подход

В рамках предлагаемого подхода математический аппарат временных автоматов непосредственно встраивается в сетевой калькулятор. Вместо использования функции, специфицирующей кривую обслуживания, в этом случае время обслуживания определяется с использованием временного автомата (сети временных автоматов) – на базе соответствующей траектории во временном автомате. Так же, как и в случае использования классических сетевых калькуляторов, гранулярность представления сети в модели может быть различной. При высокой степени детализации одним временным автоматом может быть представлен обслуживающий прибор, соответствующий контроллеру одного порта маршрутизатора. При меньшей степени детализации один временной автомат может соответствовать одному сетевому устройству (маршрутизатору, терминальному узлу). При системном исследовании больших сетей одним временным автоматом может представляться подсеть.

Использование временных автоматов позволяет разработчику достаточно простым и удобным способом специфицировать правила поведения – правила обработки транзакций в сервере/обслуживающем приборе. При этом процессу обработки транзакций разных типов могут соответствовать разные траектории во временном автомате, время обработки очередной транзакции может зависеть от предыстории функционирования временного автомата, от того, в какой локации находился автомат на момент поступления транзакции, какие значения имели локальные и глобальные переменные.

Модель исследуемой системы может быть представлена одним временным автоматом или сетью, включающей в себя несколько временных автоматов. Для спецификации взаимодействия временных автоматов могут использоваться глобальные переменные или каналы, по которым могут передаваться сигналы/события. Использование этих механизмов позволяет моделировать как прямые, так и обратные связи между обслуживающими приборами. Например, если выполняется оценка характеристик системы на основе стандарта, в котором используется управление потоком данных от приемника (таких как SpaceFibre), то противоположно направленные

каналы используются для передачи сигналов/событий, соответствующих данным и символам кредитования. В результате существует возможность оценки характеристик прямого пути передачи данных от источника к приемнику с учетом текущего состояния (наличия кредитов) на пути передачи данных.

При использовании предлагаемого подхода оценка времени фактически выполняется для рассматриваемого сценария поведения системы. Выбор сценария определяется входными данными. Входные данные для временного автомата (сети на базе временных автоматов) могут задаваться, как и для классических временных автоматов, кривыми поступления заявок. Наряду с этим, генерация потоков заявок может осуществляться с использованием временных автоматов – генераторов.

Соответственно, максимальное время определяется для рассматриваемого сценария. В ряде систем с жестким детерминизмом может существовать только один возможный сценарий поведения. Однако для многих систем может существовать несколько возможных сценариев поведения, в которых входные данные (входные потоки событий) несколько смещены во времени друг относительно друга. Если для системы возможно несколько сценариев поведения, то временные характеристики определяются для каждого из них. В дальнейшем (в зависимости от цели исследований) среди полученных временных характеристик могут быть выбраны худшее/лучшее время и сценарий, при котором оно получено. В ряде случаев используются взвешенные временные оценки – каждому сценарию ставится в соответствие весовой коэффициент. Например, он может быть равен вероятности возникновения (срабатывания) сценария. Взвешенная оценка может быть равна сумме произведений временных характеристик каждого сценария и соответствующих им коэффициентов.

Система, обладающая свойствами динамической реконфигурации, может изменять свои характеристики по собственной инициативе или по командам извне. Изменения по собственной инициативе осуществляются в тех случаях, когда обслуживающий прибор контролирует характеристики проходящих через него потоков данных, их изменения (собирает статистику), контролирует свое текущее состояние, возможно, состояния других обслуживающих приборов в системе. На основании этой информации обслуживающий прибор может принимать решение о перераспределении доступных ему ресурсов между потоками данных. Например, могут перераспределяться доля выделяемого буферного

пространства или правила выделения физического канала разным виртуальным потокам данных. Аналогичные действия могут выполняться также по команде от внешнего системного администратора (представленного в системе другим временным автоматом или каналом связи с внешним миром, по которому могут поступать события, соответствующие командам). Соответственно, временной автомат может сам изменять свои характеристики, или это изменение может выполняться в результате действий других временных автоматов, событий, происходящих по внешним каналам.

Таким образом, предлагаемый подход позволяет оценивать характеристики системы, в том числе и в условиях динамической реконфигурации. В частности, возможно исследование ситуации, когда процесс динамической реконфигурации инициируется (запускается) процессом передачи потоков данных (изменением их характеристик). Подход позволяет оценивать различные одновременно (параллельно) существующие в системе сценарии обработки транзакций разных типов, возможности по динамической реконфигурации.

Далее рассмотрим реализацию предложенного подхода. Отметим, что большинство известных инструментов, предназначенных для моделирования временных автоматов, реализованы с использованием Java. Данный язык, специфицированная в нем концепция нитей хорошо подходит для моделирования временных автоматов. Однако, как было показано выше, во многих случаях требуется интеграция системных моделей и RTL-моделей. Использование языка Java является серьезным препятствием для такого рода интеграции. Данный язык не поддерживается большинством сред моделирования, используемых для RTL-моделей. Организация передачи промежуточных результатов между системной моделью на Java и RTL-моделью, синхронизация модельного времени связаны с очень большими сложностями.

В связи с этим, нами для реализации среды моделирования были выбраны язык C++ и библиотека SystemC. Это позволяет использовать эти модели в одном модельном пространстве с RTL-моделями (обеспечивает возможность моделирования в едином модельном времени) в большинстве сред автоматизированного проектирования (САПР). Современные САПР, как правило, поддерживают SystemC, наряду с VHDL и Verilog/SystemVerilog, используемыми для написания RTL-моделей.

Модель временного автомата на SystemC (сети на базе временных автоматов) генерируется на основе xml-описания, аналогичного используемым для существующего инструментария, ори-

ентированного на использование Java. (При необходимости оно может быть дополнено новыми атрибутами).

При использовании SystemC при реализации временных автоматов существует две основные проблемы. Первой проблемой является то, что все нити, срабатывание которых оказывается запланированным на одно и то же время, могут выполняться в произвольном порядке. Штатными средствами невозможно управлять порядком их выполнения. Потенциально это может приводить к получению различных результатов в разных запусках моделирования, если передача данных между нитями выполняется с использованием переменных (изменение значений которых осуществляется мгновенно). Если же использовать для этих целей другие объекты SystemC, изменение значений которых планируется/осуществляется с задержкой во времени (с так называемой дельта-задержкой), например, `sc_signal`, то существенно увеличивается количество событий (`sc_event`), возникающих в ходе моделирования. В результате время моделирования может очень существенно возрасти, что крайне нежелательно в большинстве случаев. Для устранения этой проблемы мы используем в модели специальный служебный процесс (процесс-менеджер), который централизованно (для всех временных автоматов) определяет в каждый момент времени, какие переходы между локациями будут осуществлены, соответственно, какие связанные с ними действия будут выполнены, каковы будут новые значения переменных и параметров. Если модель исходно представляла собой сеть из нескольких временных автоматов, то в этой реализации такая сеть фактически заменяется на один эквивалентный временной автомат. При использовании процесса – менеджера для моделирования переменных и параметров – сохраняется возможность использования переменных. Это позволяет не увеличивать поток событий в модели с ростом количества переменных, параметров, временных автоматов, локаций, в которых может находиться каждый из них, переходов между локациями.

Второй проблемой является моделирование синхронных каналов связи между автоматами. В таком канале передача по нему сигнала (события) возможна только в том случае, если на передающей стороне может сработать (и сработает) переход, в набор действий которого входит передача сигнала (события) в канал, и в то же время на приемной стороне может сработать (и сработает) переход, в набор действий которого входит прием сигнала (события) из канала. При использовании классов стандартных классов systemC, таких как `sc_event_queue` или `sc_fifo`, такая синхронизация

не обеспечивается. Однако эта проблема решается за счет использования процесса – менеджера, осуществляющего определение переходов, которые могут сработать, и выбор тех из них, которые сработают, за счет чего и достигается требуемый вариант синхронизации.

В наших исследованиях во многих случаях существует необходимость передавать по каналу не идентичные, а различающиеся по своим атрибутам (свойствам) сигналы/события. Передавать их по разным каналам не представляется возможным, поскольку необходимо сохранять хронологическую последовательность их передачи. Примером такой последовательности являются символы данных и символы начала/конца пакета. Для поддержки такой функциональности в нашей реализации для событий существует возможность определять наборы атрибутов, их характеризующие. В дальнейшем, при приеме из канала события, в зависимости от значений его атрибутов, во временном автомате может выполняться различный набор действий.

Примеры использования предложенного подхода, оценка характеристик

Мы использовали предложенный подход и его реализацию для оценок характеристик сетей на базе стандарта SpaceFibre. В первом из исследований мы на разных топологиях сетей оценивали максимальное время передачи пакетов данных при одновременной передаче специальных широковещательных сообщений (Broadcast). Эти сообщения имеют более высокий приоритет, чем данные, и на время их передачи по физическому каналу передача данных на время приостанавливается. В общем случае Broadcast могут распространяться по сети различными путями (в соответствии со стандартом SpaceFibre дерево распространения Broadcast формируется динамически). Вследствие этого при использовании классического сетевого калькулятора для каждого физического канала приходится учитывать потенциально возможную задержку передачи данных из-за передачи Broadcast. При использовании предложенного подхода процесс формирования дерева распространения Broadcast моделируется на сети из временных автоматов. Это позволяет учитывать при передаче данных задержки на передачу Broadcast только для тех физических каналов, по которым они будут передаваться. Как было отмечено выше, дерево распространения Broadcast формируется динамически и может быть автоматически реконfigurировано, если происходят отказы физических

каналов или маршрутизаторов. Влияние этих изменений на время передачи данных также может быть оценено на сети из временных автоматов.

В результате использования предложенного подхода для разных сетей была получена максимальная задержка передачи данных из-за Broadcast на 15–20 % ниже, чем при использовании классических сетевых калькуляторов.

Далее мы исследовали максимальное время передачи данных по разным виртуальным сетям, для каждой из которых определены свои параметры качества сервиса. Причем параметры качества сервиса могут меняться динамически в разных фазах вычислительного процесса. Например, для разных потоков может увеличиваться/уменьшаться (в некоторых пределах) доля пропускной способности канала, которая им выделяется. Эти действия могут выполняться динамически, на основе статистики о текущих параметрах потоков. Задать аналитически формулы для кривых обслуживания каждого потока (каждой виртуальной сети) таким образом, чтобы они учитывали предысторию (статистику), которая может быть разной, оказалось практически невозможно. Коэффициенты, которые указывают текущую долю пропускной способности, могут в зависимости от предыстории принимать любые значения на интервале от 0 до 1. А сама предыстория фактически представляет собой траекторию переходов во временном автомате. В результате для оценки характеристик такой системы неизбежно происходит переход от классического сетевого калькулятора к калькулятору на базе временного автомата.

Заключение

В данном исследовании нами были рассмотрены основные ограничения классических сетевых калькуляторов, основанных на кривых поступления и обслуживания заявок и $(\min, +)$ -, $(\max, +)$ -алгебрах при оценке характеристик динамически реконfigurируемых сетей, для которых есть требования чувствительности ко времени. Для устранения этих ограничений предложены подход к формированию сетевых калькуляторов на базе временных автоматов и его реализация на SystemC. Рассмотрены примеры, показывающие возможности предложенного подхода. Показано, что предложенный подход позволяет получать более точные оценки максимального времени (менее завышенные оценки, по сравнению с использованием сетевых калькуляторов), а также может использоваться для решения задач, для которых возможностей классических сетевых калькуляторов оказывается недостаточно.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Time-sensitive networking in automotive embedded systems: State of the art and research opportunities / M. Ashjaei [et al.] // *Journal of systems architecture*. 2021. Vol. 117. P. 102137.
2. Supporting timing analysis of vehicular embedded systems through the refinement of timing constraints / S. Mubeen [et al.] // *Softw. syst. model*. 2019. Vol. 18. P. 39–69.
3. Recent advances and trends in on-board embedded and networked automotive systems / L. L. Bello, R. Mariani, S. Mubeen, S. Saponara // *IEEE transactions on industrial informatics*. 2019. Vol. 1. P. 1038–1051.
4. An automated configuration framework for TSN networks / B. Houtan [et al.] // *22nd IEEE International conference on industrial technology (ICIT)*. 2021. Vol. 1. P. 771–778.
5. Timely survey of time-sensitive networking: past and future directions / Y. Seol [et al.] // *IEEE access*. 2021. Vol. 9. P. 142506–142527.
6. *Ditzel G. A., Didier P.* Time sensitive network (TSN) protocols and use in EtherNet/IP systems // *ODVA industry conference 17th annual meeting*. 2015. 24 p.
7. A time-sensitive networking (TSN) simulation model based on OMNET++ / J. Jiang [et al.] // *IEEE International conference on mechatronics and automation (ICMA)*. 2018. P. 643–648.
8. Synthesising schedules to improve QoS of best-effort traffic in TSN networks / B. Houtan [et al.] // *29th International conference on real-time networks and systems*. 2021. P. 68–77.
9. A service-oriented real-time communication scheme for AUTOSAR adaptive using OPC UA and time-sensitive networking / A. Arestova, M. Martin, K.-S. J. Hielscher, R. German // *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 7. P. 29 p.
10. Time-sensitive networking (TSN) for industrial automation: a survey / G. Wang [et al.]. arXiv: 2306.03691. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.03691>.
11. Qos guaranteed resource allocation for coexisting embb and urllc traffic in 5g industrial networks / D. Shen [et al.] // *IEEE 28th International conference on embedded and real-time computing systems and applications (RTCSA)*. IEEE. 2022. P. 81–90.
12. Deterministic networking (detnet) bounded latency / N. Finn, E. Mohammadpour, J. Zhang, B. Varga. *Internet engineering task force (IETF)*. 2022. 26 p.
13. Segment routing (SR) based bounded latency / M. G. Chen [et al.] // *Internet-draft. IETF*, May 2019. P. 12.
14. Latency analysis of multiple classes of avb traffic in tsn with standard credit behavior using network calculus / L. Zhao [et al.] // *IEEE transactions on industrial electronics*. 2021. Vol. 68, № 10. P. 10291–10302.
15. *Le Boudec J.-Y., Thiran P.* Network calculus: a theory of deterministic queuing systems for the internet. Springer, 2001.
16. *Maile L., Hielscher K.-S., German R.* Network calculus results for TSN: an introduction // *Proc. of the Information communication technologies conference (ICTC – 2020)*. 2020. P. 131–140.
17. *Zhao L., Pop P., Steinhorst S.* Quantitative performance comparison of various traffic shapers in time-sensitive networking // *IEEE transactions on network and service management*. 2022. Vol. 19, № 3. P. 2899–2928.
18. *Geyer F., Bondorf S.* Graph-based deep learning for fast and tight network calculus analyses // *IEEE transactions on network science and engineering*. 2021. Vol. 8, № 1. P. 75–88.
19. *Bemten A. V., Kellerer W.* Network calculus: a comprehensive guide // *Technical report*. 2016. № 201603. P. 54. Doi: 10.13140.
20. *Geyer F., Bondorf S.* Network synthesis under delay constraints: The power of network calculus differentiability // *Proc. of IEEE INFOCOM*. May 2022. 2022. P. 18.
21. *Geyer F., Carle G.* Network engineering for real-time networks: comparison of automotive and aeronautic industries approaches // *IEEE commun. mag.* 2016. Vol. 54, № 2. P. 106–112.
22. *Bouillard A., Jouhet L., Thierry E.* Service curves in network calculus: dos and dont's // *Research report*. INRIA. 2009. P. 28.
23. *Ciucu F., Burchard A., Liebeherr J.* A network service curve approach for the stochastic analysis of networks // *ACM SIG-metrics performance evaluation review*. 2005. Vol. 33, № 1. P. 279–290.
24. *Jiang Yu., Liu Yo.* Stochastic network calculus. Vol. 1. Springer, 2008.
25. *Guidolin D., Boyer M.* A first network calculus model for cyclic queuing and forwarding // *Junior researcher workshop on real-time computing*. June 2023. 2023. P. 5.
26. *Scheffler A., Bondorf S.* Network calculus for bounding delays in feedforward networks of FIFO queueing systems // *Proc. of QEST*. 2021. P. 149–167.
27. *Geyer F., Scheffler A., Bondorf S.* Tightening network calculus delay bounds by predicting flow prolongations in the FIFO analysis // *Proceedings of the 27th IEEE real-time and embedded technology and applications symposium (RTAS)*. 2021. 3. 14.

28. Nikolaus P., Schmitt J. B. Improving delay bounds in the stochastic network calculus by using less stochastic inequalities // Proc. of EAI value tools. 2020. P. 8.
29. Bouillard A. Trade-off between accuracy and tractability of network calculus in FIFO networks // Performance evaluation. 2022. Vol. 153. P. 102250.
30. Herbreteau F., Srivathsan B., Walukiewicz I. Better abstractions for timed automata // Inf. comput. 2016. № 251. P. 67–90.
31. Al-Bataineh O., Reynolds M., French T. Finding minimum and maximum termination time of timed automata models with cyclic behavior. Elsevier, 2016. 18 p.
32. Alur R., La Torre S., Pappas G. Optimal paths in weighted timed automata // Lecture notes in computer science. 2001. № 2034. P. 49–62.
33. Modelling and analysis of security protocols / P. Ryan [et al.] Addison Wesley, 2001.
34. Mobile data offloading: how much can wifi deliver? / K. Lee [et al.] // Proceedings of the 6th International conference. 2010. P. 12.
35. Andre E., D. Lime D., Roux O. H. Reachability and liveness in parametric timed automata // Logical methods in computer science. 2022. Vol. 18, is. P. 31:1–31:41.
36. Andr'e E., Lime D., Roux O. H. Decision problems for parametric timed automata // ICFEM. Vol. 10009: Lecture notes in computer science. Tokyo, Japan: Springer, 2016. P. 400–416
37. Andr'e E., Lime D., Ramparison M. TCTL model checking lower/upper-bound parametric timed automata without invariants // Formats. Vol. 11022: Lecture notes in computer science. Beijing, China: Springer, 2018. P. 1–17.
38. Language emptiness of continuous-time parametric timed automata / N. Benès, P. Bezděk, K. Gulstrand Larsen, J. Srba // ICALP. Part II. Vol. 9135: Lecture notes in computer science. Kyoto, Japan: Springer, 2015. P. 69–81.
39. Andr'e E. What's decidable about parametric timed automata? // International journal on software tools for technology transfer 21.2. 2019. April. P. 203–219.

REFERENCES

- Ashjaei M., Bello L. L., Daneshtalab M., Patti G., Saponara S., Mubeen S. Time-sensitive networking in automotive embedded systems: State of the art and research opportunities. // Journal of systems architecture. 2021;117: 102137.
- Mubeen S., Nolte T., Sjödin M., Lundbäck J., Lundbäck K.-L. Supporting timing analysis of vehicular embedded systems through the refinement of timing constraints. Softw. syst. model. 2019;18:39–69.
- Bello L. L., Mariani R., Mubeen S., Saponara S. Recent advances and trends in on-board embedded and networked automotive systems. IEEE transactions on industrial informatics. 2019, vol. 1, pp. 1038– 1051.
- Houtan B., Bergström A., Ashjaei M., Daneshtalab M., Sjödin M., Mubeen S. An automated configuration framework for TSN networks. 22nd IEEE International conference on industrial technology (ICIT). 2021, vol. 1, pp. 771–778.
- Seol Y., Hyeon D., Min J., Kim M., Paek J. Timely survey of time-sensitive networking: past and future directions. IEEE access. 2021, vol. 9, pp. 142506–142527.
- Ditzel G. A., Didier P. Time sensitive network (TSN) protocols and use in EtherNet/IP systems. ODVA industry conference 17th annual meeting. 2015, pp. 24.
- Jiang J., Li Y., Hong S., Xu A., Wang K. A time-sensitive networking (TSN) simulation model based on OMNET++ / J. Jiang [et al.] // IEEE International conference on mechatronics and automation (ICMA). 2018, pp. 643–648.
- Houtan B., Ashjaei M., Daneshtalab M., Sjödin M., Mubeen S. Synthesising schedules to improve QoS of best-effort traffic in TSN networks. 29th International conference on real-time networks and systems. 2021, pp. 68–77.
- Arestova A., Martin M., Hielscher K.-S. J., German R., A service-oriented real-time communication scheme for AUTOSAR adaptive using OPC UA and time-sensitive networking. Sensors. 2021;21(7):24.
- Wang G., Zhang T., Xue Ch., Wang J., Nixon M., Han S. Time-sensitive networking (TSN) for industrial automation: a survey. arXiv: 2306.03691. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.03691>.
- Shen D., Zhang T., Wang J., Deng Q., Han S., Hu X. S. Qos guaranteed resource allocation for coexisting embb and urllc traffic in 5g industrial networks / D. Shen [et al.] // IEEE 28th International conference on embedded and real-time computing systems and applications (RTCSA). IEEE. 2022, pp. 81–90.
- Finn N., Mohammadpour E., Zhang J., Varga B. Deterministic networking (detnet) bounded latency. Internet engineering task force (IETF). 2022. 26 p.
- Chen M. G., Xuesong G., Li Zh. Segment routing (SR) based bounded latency. Internet-draft. IETF, May 2019, pp. 12.
- Zhao L., Pop P., Zheng Zh., Daigmorte H., Boyer M. Latency analysis of multiple classes of avb traffic in tsn with standard credit behavior using network calculus. IEEE transactions on industrial electronics. 2021;68(10):10291–10302.

15. Le Boudec J.-Y., Thiran P. Network calculus: a theory of deterministic queuing systems for the internet. Springer; 2001.
16. Maile L., Hielscher K.-S., German R. Network calculus results for TSN: an introduction. Proc. of the Information communication technologies conference (ICTC – 2020). 2020, pp. 131–140.
17. Zhao L., Pop P., Steinhorst S. Quantitative performance comparison of various traffic shapers in time-sensitive networking. IEEE transactions on network and service management. 2022;19(3):2899–2928.
18. Geyer F., Bondorf S. Graph-based deep learning for fast and tight network calculus analyses. IEEE transactions on network science and engineering. 2021;8(1):75–88.
19. Bemten A. V., Kellerer W. Network calculus: a comprehensive guide. Technical report. 2016;(201603):54. Doi: 10.13140.
20. Geyer F., Bondorf S. Network synthesis under delay constraints: The power of network calculus differentiability. Proc. of IEEE INFOCOM. May 2022. 2022, pp. 18.
21. Geyer F., Carle G. Network engineering for real-time networks: comparison of automotive and aeronautic industries approaches. IEEE commun. mag. 2016;54(2):106–112.
22. Bouillard A., Jouhet L., Thierry E. Service curves in network calculus: dos and dont's. Research report. INRIA. 2009, pp. 28.
23. Ciucu F., Burchard A., Liebeherr J. A network service curve approach for the stochastic analysis of networks. ACM SIG-metrics performance evaluation review. 2005;33(1):279–290.
24. Jiang Yu., Liu Yo. Stochastic network calculus. Vol. 1. Springer; 2008.
25. Guidolin D., Boyer M. A first network calculus model for cyclic queuing and forwarding. Junior researcher workshop on real-time computing. June 2023. 2023, pp. 5.
26. Scheffler A., Bondorf S. Network calculus for bounding delays in feedforward networks of FIFO queueing systems. Proc. of QEST. 2021, pp. 149–167.
27. Geyer F., Scheffler A., Bondorf S. Tightening network calculus delay bounds by predicting flow prolongations in the FIFO analysis. Proceedings of the 27th IEEE real-time and embedded technology and applications symposium (RTAS). 2021, pp. 14.
28. Nikolaus P., Schmitt J. B. Improving delay bounds in the stochastic network calculus by using less stochastic inequalities. Proc. of EAI value tools. 2020, pp. 8.
29. Bouillard A. Trade-off between accuracy and tractability of network calculus in FIFO networks. Performance evaluation. 2022;153: 102250.
30. Herbreteau F., Srivathsan B., Walukiewicz I. Better abstractions for timed automata. Inf. comput. 2016;(251):67–90.
31. Al-Bataineh O., Reynolds M., French T. Finding minimum and maximum termination time of timed automata models with cyclic behavior. Elsevier; 2016. 18 p.
32. Alur R., La Torre S., Pappas G. Optimal paths in weighted timed automata. Lecture notes in computer science. 2001;(2034):49–62.
33. Ryan P., Schneider S., Goldsmith M., Lowe G., Roscoe B. Modelling and analysis of security protocols. Addison Wesley; 2001.
34. Lee K., Lee J., Yi Y., Rhee I., Chong S. Mobile data offloading: how much can wifi deliver?. Proceedings of the 6th International conference. ACM; 2010, pp. 12.
35. Andre E., D. Lime D., Roux O. H. Reachability and liveness in parametric timed automata. Logical methods in computer science. 2022. Vol. 18, is., pp. 31:1–31:41.
36. Andr'e E., Lime D., Roux O. H. Decision problems for parametric timed automata. ICFEM. Vol. 10009: Lecture notes in computer science. Tokyo, Japan: Springer; 2016, pp. 400–416.
37. Andr'e E., Lime D., Ramparison M. TCTL model checking lower/upper-bound parametric timed automata without invariants. Formats. Vol. 11022: Lecture notes in computer science. Beijing, China: Springer; 2018, pp. 1–17.
38. Ben's N., Bezd'ek P., Gulstrand L. K., Srba J. Language emptiness of continuous-time parametric timed automata. ICALP. Part II. Vol. 9135: Lecture notes in computer science. Kyoto, Japan: Springer; 2015, pp. 69–81.
39. Andr'e E. What's decidable about parametric timed automata?. International journal on software tools for technology transfer 21.2. 2019. April, pp. 203–219.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Суворова Елена Александровна, кандидат технических наук, заведующая лабораторией сетей и систем на-кристалле Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Suvorova Elena A., PhD in Technical Sciences, Head at the Laboratory of Networks and the Systems-on-chip, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Область научных интересов – динамическая реконфигурация как средство адаптации локальных вычислительных сетей и систем-на-кристалле к решаемым задачам и к сбоям и отказам, возникающим в ходе эксплуатации систем.

Поступила в редакцию 09.01.2024

Поступила после рецензирования 11.01.2024

Принята к публикации 29.01.2024

Research interests – dynamic reconfiguration as a means to adapt local area networks and systems-on-a-chip to the tasks being solved and to faults that occur during the life of systems.

Received 09.01.2024

Revised 11.01.2024

Accepted 29.01.2024

СОДЕРЖАНИЕ

Академику Владимиру Валентиновичу
Окрепилову – 80 лет! 5

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Коршунов Г. И., Макаров Е. Д., Борисенко К. А.
Обеспечение качества закупки электронной
компонентной базы на основе статических,
динамических моделей и нейронных
сетей 7

Коршунов Г. И., Макаров Е. Д. Организация
прослеживаемости электронной продук-
ции на этапах жизненного цикла
на основе базовой цифровой модели 12

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

Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Гулиев Р. Б.
Измерение параметров цвета элементов
оптической системы экспериментальной
колориметрической установкой 17

Мисникова Т. С. Контроль качества медной
руды с помощью метода лазерно-
искровой эмиссионной спектроскопии 22

**Афанасьева В. И., Залищук А. А., Нена-
шев В. А., Григоров М. Ю., Морозов А. В.**
Эксперименты по контролю количества
объектов на поверхности на основе
обработки лазерных данных и методов
распознавания с борта малых летатель-
ных аппаратов 28

Сердюк К. В. Интегрированная система
контроля технического состояния авиа-
ционного двигателя на базе спектро-
скопических измерений 36

Казakov В. И., Китаев В. В. Применение
волоконной оптики в спектроскопических
системах контроля физических и техноло-
гических процессов 42

Рутков Е. В., Новикова Ю. А., Казаев А. А.
Подбор оптимального режима работы
датчика измерения вакуума Пирани 51

CONTENTS

Academician Vladimir Valentinovich
Okrepilov – 80 years old! 5

PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. PRODUCTION ORGANIZATION

Korshunov G. I., Makarov E. D., Borisenko K. A.
Ensuring the quality of procurement of
electronic component base based on static,
dynamic models and neural networks 7

Korshunov G. I., Makarov E. D. Organization
of traceability of electronic products at life
cycle stages based on a basic digital
model 12

METHODS AND DEVICES OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT

Maierov E. E., Pushkina V. P., Guliyev R. B.
Measurement of the color parameters
of the elements of the optical system by an
experimental colorimetric installation 17

Misnikova T. S. Quality control of copper
ore using laser-induced breakdown
spectroscopy technique 22

**Afanasyeva V. I., Zalischuk A. A., Nena-
shv V. A., Grigorov M. Yu., Morozov A. V.**
Experiments to control the number of objects
on the surface based on laser data
processing and recognition methods
on board small aircraft 28

Serdiuk K. V. Integrated system of aircraft
engine technical condition control
based on spectroscopic measurements 36

Kazakov V. I., Kitaev V. V. Application of fibre
optics in spectroscopic systems of control
of physical and technological processes 42

Rutkov E. V., Novikova Yu. A., Kazaev A. A.
Optimization of operating conditions for
a Pirani vacuum gauge 51

Дьяченко А. А., Пинчук М. Э. Автоматизированная система для сканирования пространственной структуры плазменной струи методом оптической эмиссионной спектроскопии..... 56

Епифанцев К. В., Петров Г. А., Белопухов В. Н., Заякин О. А. Исследование возможности применения одновиткового вихретокового датчика для измерения дефектов формы 63

СИСТЕМЫ, СЕТИ И УСТРОЙСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Суворова Е. А. Сетевые калькуляторы на основе временных автоматов для оценки характеристик вычислительных сетей с возможностью динамической реконфигурации 77

Dyachenko A. A., Pinchuk M. E. Automated system for scanning the spatial structure of a plasma jet using optical emission spectroscopy..... 56

Epifancev K. V., Petrov G. A., Belopukhov V. N., Zayakin O. A. Study of the possibility of using a single-turn eddy current sensor for measurement of mold defects..... 63

TELECOMMUNICATION SYSTEMS, NETWORKS AND DEVICES

Suvorova E. A. Network calculus based on timed automata for the characteristics evaluation of computer networks with the dynamic reconfiguration 77