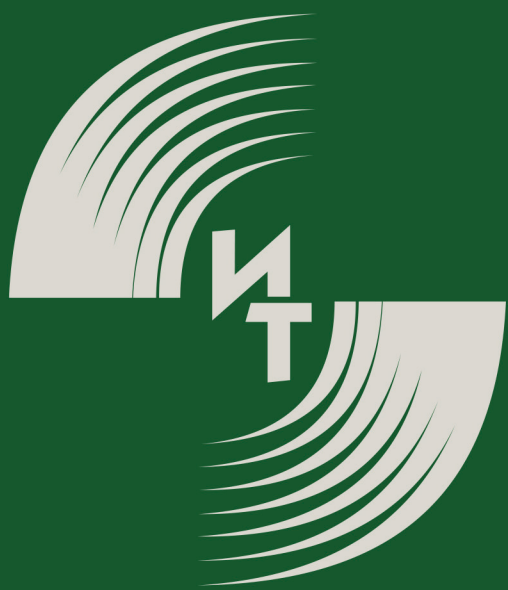




**ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА
2021
№10**



RIGOL

Possibilities and More

Цифровой осциллограф DS8000-R серия

2 устройства в стандартной стойке высотой 1U

Возможность получения
до **512** измерительных
каналов



**Самая высокая производительность на
сегодняшний день в решении сложнейших задач
на встраиваемых системах.**

- Максимальная частота дискретизации 10 Гбит / с
- Высокая плотность, большое количество каналов
- Максимальная глубина записи: до 500 М точек в штатной комплектации приборов
- Анализатор частотного спектра в реальном времени
- Максимальная скорость захвата осциллограмм: до 600 000 осц/сек
- Анализатор цифровых протоколов для общей последовательности шин
- Независимая цветовая персистенция для БПФ

На правах рекламы

О компании RIGOL Technologies:

RIGOL Technologies динамично развивающаяся компания в области измерительной и испытательной техники. Наша премиальная линейка продуктов включает в себя цифровые запоминающие осциллографы, цифровые осциллографы смешанных сигналов, анализаторы спектра, функциональные генераторы сигналов произвольной формы, программируемые источники питания и нагрузки, цифровые мультиметры, системы сбора данных и прикладное программное обеспечение.

Наши решения сочетают в себе высокую производительность, безупречное качество и передовые характеристики, при этом привлекают своими ценами.

Продукция RIGOL способствует повышению качества, сокращению сроков и снижению стоимости проведения испытаний, это лучшая инвестиция в ваше производство.



ООО ТД "ЮНИТ СЕРВИС"

Телефоны:

+7-812-983-49-04, +79216447168

адрес электронной почты:

tdus@td-unit servis.ru

Веб-сайт: td-unit servis.ru

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2021 № 10 октябрь

Ежемесячный
научно-технический
журнал

Основан в 1939 г.

С 1958 г. переводится
на английский язык
под названием
«Measurement Techniques»
издательством
Springer Nature
www.springer.com/11018

Издаётся с приложением
«Метрология»

УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологии
им. Д. И. Менделеева»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт оптико-физических
измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт физико-технических и
радиотехнических измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической
службы»

ФГБУ «Российский институт
стандартизации»

МОО «Метрологическая академия»

СОДЕРЖАНИЕ

■ ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЭТАЛОНЫ

- Т. П. Акимова, Ю. Г. Захаренко, Н. А. Кононова, В. Л. Федорин, З. В. Фомкина, К. В. Чекирда. Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2021 3

■ ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

- А. Р. Горбушин, Е. А. Крапивина, М. Н. Тытык. Статическая составляющая температурной погрешности тензометрических весов: определение коэффициента температурной чувствительности 8

■ ИЗМЕРЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

- Ю. К. Тараненко. Методы дискретной вейвлет-фильтрации измерительных сигналов: алгоритм выбора метода 14

■ ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Д. Н. Фроловцев, С. А. Магницкий, А. В. Дёмин. Методика измерений поляризационно-запутанных состояний бифотонов с помощью квантового томографа 21

■ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

- Д. С. Купалов, В. Н. Барышев, И. Ю. Блинов, А. И. Бойко, Ю. С. Домнин, Е. В. Иванченко. Бюджет неопределённости рубидиевого репера частоты фонтанного типа: результаты предварительных исследований 28

■ МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. А. Недбайло. Датчики импульсного давления: критерии применимости 34

■ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- М. А. Денисов. Метод пирометрии с мобильными жаростойкими экранами 41

■ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. В. Чернова, Ю. Л. Николаев, П. Н. Шкатов, М. Ю. Прилепко. Обнаружение и исследование аномалий магнитных полей над поверхностными дефектами сложнопрофильных деталей 46

■ МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. Г. Никитаев, А. Н. Проничев, Н. Н. Тупицын, А. Д. Палладина, В. В. Дмитриева, А. В. Козырева, М. С. Майоров, М. А. Соломатин, Е. А. Дружинина, Е. В. Поляков, Б. Б. Батуев. Исследование текстурных признаков для задач распознавания клеток костного мозга в информационно-измерительных системах онкогематологии 53

- Д. С. Махов, Г. Р. Сагателян, А. В. Самородов. Цветовая мера для калибровки систем цифровой микроскопии 60

■ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. М. Тележко, М. В. Тютчев, М. В. Аверьянова, А. Д. Паранин, Е. В. Хойна. Газовые сенсоры для измерений концентрации вредных веществ: особенности применения 65

Главный редактор
В. Н. Крутиков

Редакционная коллегия:

И. В. Емельянова
(зам. гл. редактора)
В. И. Белоцерковский
С. И. Донченко
Л. К. Исаев
А. Д. Козлов
Е. П. Кривцов
А. Ю. Кузин
С. В. Медведевских
В. В. Окрепилов
В. Н. Храменков
И. А. Шайко
В. В. Швыдун

Научные редакторы *Грачева И. Л., Федяева М. В.*
Корректор *Бучная М. В.*
Иллюстрации *Бабаев И. Н.*
Компьютерная верстка *Нотт С. А.*
Реклама, распространение и подписка *Керсова Л. А.*
Тел.: +7(495)430-28-02, kersova@vniims.ru

Сдано в набор: 22.09.2021.
Подписано в печать: 25.10.2021.
Формат 60х90 1/8. Бумага мелованная. Печать офсетная.
Усл. п.л. 9,0. Уч.-изд. л. 11,5. Тир. 200 экз. Зак. 21-24л.
Свободная цена.
Отпечатано в ООО «Типография «Миттель Пресс»,
127254, Москва, ул. Руставели, 14, с. 6, оф. 7.

Издание зарегистрировано Роскомнадзором
Свидетельство о регистрации: ПИ № ФС77-21572
от 15.07.2005.

Издатель: ФГУП «ВНИИМС».
Адрес редакции и издателя: 119361, Москва,
ул. Озёрная, 46, ФГУП «ВНИИМС».
Тел.: +7(495)781-48-70
E-mail: izmt@vniims.ru
Сайт: www.izmt.ru

Редакция не несёт ответственности за содержание
рекламных материалов.
Точка зрения редакции может не совпадать с позицией
авторов.
Полное или частичное воспроизведение материалов
допускается с письменного разрешения редакции.
При перепечатке материалов ссылка на журнал
«Измерительная техника» обязательна.
Все поступившие в редакцию материалы подлежат
рецензированию.
Материалы, переданные в редакцию, не возвращаются.
Требования к оформлению статей размещены на сайте
www.izmt.ru
Знаком информационной продукции не маркируется.

■ STATE STANDARDS

T. P. Akimova, Yu. G. Zakharenko, N. A. Kononova, V. L. Fedorin, Z. V. Fomkina, K. V. Chekirda. The State primary standard of the unit of length – metre GET 2-2021 3

■ GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

A. R. Gorbushin, E. A. Krapivina, M. N. Tytyk. Static component of the temperature error of the strain-gauge balance: determination of the temperature sensitivity coefficient 8

■ MEASUREMENTS IN INFORMATION TECHNOLOGIES

Yu. K. Taranenko. Methods of discrete wavelet filtering of measuring signals: an algorithm for choosing a method 14

■ OPTICOPHYSICAL MEASUREMENTS

D. N. Frolovtssev, S. A. Magnitskiy, A. V. Demin. The measurement method of the polarization-entangled states of biphotons using a quantum tomograph 21

■ TIME AND FREQUENCY MEASUREMENTS

D. S. Kupalov, V. N. Baryshev, I. Yu. Blinov, A. I. Boiko, Yu. S. Domnin, E. V. Ivanchenko. The uncertainty budget of the rubidium fountain: the preliminary results 28

■ MECHANICAL MEASUREMENTS

A. A. Nedbaylo. The impulse pressure transducers: applicability criteria 34

■ TERMOPHYSICAL MEASUREMENTS

M. A. Denisov. Pyrometry method with mobile heat-resistant screens 41

■ ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

A. V. Chernova, Yu. L. Nikolaev, P. N. Shkatov, M. Yu. Prilepko. Detection and investigation of magnetic field anomalies over surface defects of complex-profile parts 46

■ MEDICAL AND BIOLOGICAL MEASUREMENTS

V. G. Nikitaev, A. N. Pronichev, N. N. Tupitsin, A. D. Palladina, V. V. Dmitrieva, A. V. Kozyreva, M. S. Mayorov, M. A. Solomatin, E. A. Druzhinina, E. V. Polyakov, B. B. Batuev. The study of texture features for the recognition problems of bone marrow cells in information-measuring systems of oncohematology 53

D. S. Makhov, G. R. Sagatelyan, A. V. Samorodov. Color calibration slide for digital microscopy systems 60

■ PHYSICO-CHEMICAL MEASUREMENTS

V. M. Telezhko, M. V. Tyutchev, M. V. Averianova, A. D. Pararin, E. V. Khoina. Gas sensors for measurement of the concentration toxic substances: peculiarities of the use 65

Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2021

Татьяна Павловна Акимова¹, Юрий Гордеевич Захаренко², Наталья Александровна Кононова³, Виктор Леонидович Федорин⁴, Зоя Викторовна Фомкина⁵✉, Константин Владимирович Чекирда⁶

1, 2, 3, 4, 5, 6 Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия, ¹T.P.Akimova@vniim.ru, ²Y.G.Zackharenko@vniim.ru, ³N.A.Kononova@vniim.ru, ⁴V.L.Fedorin@vniim.ru, ⁵Z.V.Fomkina@vniim.ru ✉, ⁶K.V.Chekirda@vniim.ru

Аннотация. Описаны основные этапы совершенствования Государственного первичного эталона единицы длины – метра. Описаны новые источники излучения и установки. Представлены результаты исследований метрологических характеристик источников эталонного излучения на длинах волн 633 и 532 нм. Исследования проведены с помощью He–Ne/I₂-лазера, стабилизированного по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде 127, установки для измерений разности частот источников лазерного излучения и комплекса аппаратуры для измерения частоты (длины волны в вакууме) лазеров в диапазоне длин волн 500–1050 нм на основе оптической частотной гребёнки. В результате исследований определены основные источники и границы составляющих неисключённой систематической погрешности и стандартной неопределённости по типу В, среднее квадратическое отклонение и стандартная неопределённость по типу А. Проведён сравнительный анализ метрологических характеристик ГЭТ 2-2010 и ГЭТ 2-2021, показывающий выполнение в ходе совершенствования эталона поставленных задач. Таким образом, стало возможным воспроизведение единицы длины на длине волны 633 нм со средним квадратическим отклонением $1,6 \cdot 10^{-12}$ и на длине волны 532 нм со средним квадратическим отклонением $1,3 \cdot 10^{-12}$, расширен диапазон передачи единицы длины источникам лазерного излучения и другим современным высокоточным средствам измерений. Полученные метрологические характеристики эталона не уступают лучшим мировым аналогам. Государственный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2021 успешно прошёл испытания и утверждён приказом Росстандарта.

Ключевые слова: государственный первичный эталон, воспроизведение единицы, передача единицы, стабилизированный лазер, оптическая частотная гребёнка, стандарт частоты и времени, интерференционный компаратор, сличения

Для цитирования: Акимова Т. П., Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Федорин В. Л., Фомкина З. В., Чекирда К. В. Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2021 // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 3–7. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-3-7>

The State primary standard of the unit of length – metre GET 2-2021

Tatiana P. Akimova¹, Yuri G. Zackharenko², Natalia A. Kononova³, Victor L. Fedorin⁴, Zoya V. Fomkina⁵✉, Konstantin V. Chekirda⁶

1, 2, 3, 4, 5, 6 D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia, ¹T.P.Akimova@vniim.ru, ²Y.G.Zackharenko@vniim.ru, ³N.A.Kononova@vniim.ru, ⁴V.L.Fedorin@vniim.ru, ⁵Z.V.Fomkina@vniim.ru ✉, ⁶K.V.Chekirda@vniim.ru

Abstract. The main stages of modernization of the State primary standard of the unit of length are described. The structure of the standard, new laser sources and units are described. The results of research of metrological characteristics of lasers at wavelengths of 633 and 532 nm are presented. The research were carried out by the He–Ne/I₂ stabilized laser, the unit for measuring the frequency difference of laser radiation sources and the complex of equipment for measurement of laser frequency (wavelength in vacuum) in the wavelength range from 500 to 1050 nm (comb generator). As a result of the research, the main sources of the components of residual systematic error and standard uncertainty (type B), standard deviation and standard uncertainty (type A). The comparative analysis of the metrological characteristics of GET 2-2010 and GET 2-2021 are also given. Thus, it became possible to realize the unit of length at the wavelength of 633 nm with standard deviation of $1,6 \cdot 10^{-12}$ and at the wavelength of 532 nm with standard deviation of $1,3 \cdot 10^{-12}$, and the range of transferring of the unit of length to laser radiation sources and other modern high-precision measuring systems has been expanded. The State primary standard of the unit of length GET 2-2021 has been successfully tested and approved by the order of Rosstandart.

Keywords: the State primary standard of the unit of length – metre, realization of the unit, transferring of the unit, frequency stabilized laser, optical frequency comb, frequency and time standard, interference comparator, comparisons

Введение. В последние годы в отечественном инновационном производстве в таких областях промышленности,

как авиа- и ракетостроение, судостроение, прецизионное станкостроение и др. всё чаще применяются лазерные

интерференционные технологии измерений, а точность лазерных измерительных систем, заявленная производителем, сравнима с точностью рабочих эталонов. Таким образом, с целью обеспечения единства измерений в области геометрических измерений в Российской Федерации необходимо постоянно повышать точность воспроизведения единицы длины и её передачи источникам лазерного излучения и другим современным высокоточным средствам измерений.

В 2020 г. во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ) проведены работы по совершенствованию Государственного первичного эталона единицы длины – метра ГЭТ 2-2010 в рамках реализации Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 г. в области развития эталонной базы. Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2021 утверждён приказом Росстандарта № 63 от 02.02.2021 г.

Цель данной исследовательской работы – расширение функциональных возможностей, расширение диапазона передачи единицы длины и улучшение метрологических характеристик эталона, создание условий для участия Российской Федерации в международных ключевых сличениях для подтверждения калибровочных и измерительных возможностей, сохранения метрологического суверенитета Российской Федерации. Достижение лидерства Российской Федерации в международных метрологических организациях невозможно без разработки современных средств воспроизведения и передачи единицы длины.

Описание ГЭТ 2-2021. Исследование метрологических характеристик. В состав ГЭТ 2-2021 вошли следующие технические средства и вспомогательные устройства:

источник эталонного излучения – He–Ne/I₂-лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде 127;

источник эталонного излучения – Nd:YAG-лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде 127;

транспортируемый источник эталонного излучения – He–Ne/I₂-лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде 127;

комплекс аппаратуры для измерения частоты (длины волны в вакууме) лазеров в диапазоне длин волн 500–1050 нм;

стандарт частоты и времени водородный Ч1-1003М;

установка для измерений разности частот источников лазерного излучения;

компаратор универсальный интерференционный метровый;

компаратор лазерный интерференционный для измерения длины в субмикрометровом и нанодиапазоне;

интерферометр гетеродинный;

компаратор лазерный интерференционный тридцатиметровый.

В соответствии с Рекомендацией Международного комитета мер и весов [1] единица длины воспроизводится источниками эталонного излучения – частотно-стабилизированными лазерами на длинах волн 633 и 532 нм. Воспроизведение и передача единицы на длине волны 633 нм осуществляется с помощью двух He–Ne/I₂-лазеров, стабилизированных по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде 127. Один из источников разработан и создан во ВНИИМ и участвовал в ряде сличений [2]. Второй источник производства фирмы Winters Electro-Optics, Inc. (США) – транспортируемый, что позволяет передавать единицу длины стационарным источникам излучения [3].

Воспроизведение единицы на длине волны 532 нм производится с помощью Nd:YAG-лазера, стабилизированного по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде 127. Данный лазер разработан и изготовлен Институтом лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН) [4–8].

В ходе работ по исследованию эталона определены метрологические характеристики источников эталонного излучения. Среднее квадратическое отклонение (СКО) результатов измерений He–Ne/I₂-лазера и Nd:YAG-лазера получено

с помощью комплекса аппаратуры для измерения частоты (длины волны в вакууме) лазеров в диапазоне длин волн 500–1050 нм (далее – комплекс). СКО результата измерений транспортируемого He–Ne/I₂-лазера определяли с помощью He–Ne/I₂-лазера и установки для измерений разности частот источников лазерного излучения (далее – установки) из состава эталона.

В ходе исследований выявлены основные источники и границы составляющих неопределённости

Таблица 2

СКО и стандартная неопределённость по типу А He–Ne/I₂-лазера и Nd:YAG-лазера

Источник погрешности / неопределённости	He–Ne/I ₂ -лазер	Nd:YAG-лазер
СКО ($n=100$)	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-12}$
u_A	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-12}$

Таблица 1

Источники и границы составляющих НСП и неопределённости по типу В He–Ne/I₂-лазера и Nd:YAG-лазера

Источник погрешности / неопределённости	He–Ne/I ₂ -лазер		Nd:YAG-лазер	
	НСП	u_B	НСП	u_B
Нестабильность частоты оптической частотной гребёнки	$3,0 \cdot 10^{-14}$	$1,8 \cdot 10^{-14}$	$2,6 \cdot 10^{-14}$	$1,5 \cdot 10^{-14}$
Метод измерений	$1,6 \cdot 10^{-13}$	$9,4 \cdot 10^{-14}$	$1,4 \cdot 10^{-13}$	$7,8 \cdot 10^{-14}$
Температура отростка ячейки	$6,3 \cdot 10^{-13}$	$3,7 \cdot 10^{-13}$	$5,1 \cdot 10^{-13}$	$3,0 \cdot 10^{-13}$
Ширина модуляции	$4,4 \cdot 10^{-13}$	$2,5 \cdot 10^{-13}$	$3,7 \cdot 10^{-13}$	$2,1 \cdot 10^{-13}$
Мощность излучения	$8,8 \cdot 10^{-14}$	$5,1 \cdot 10^{-14}$	$7,3 \cdot 10^{-14}$	$4,2 \cdot 10^{-14}$
Температуры стенки ячейки	$1,3 \cdot 10^{-13}$	$7,4 \cdot 10^{-14}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$6,2 \cdot 10^{-14}$
Нестабильность частоты, вызванная работой системы автоматической подстройки частоты	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$6,3 \cdot 10^{-13}$	$9,2 \cdot 10^{-13}$	$5,3 \cdot 10^{-13}$

Таблица 3

Метрологические характеристики ГЭТ 2-2010 и ГЭТ 2-2021

Метрологические характеристики	ГЭТ 2-2010	ГЭТ 2-2021
Номинальные значения длин волн, при которых воспроизводится единица, нм	633	633 532
Диапазон передачи единицы длины, м	$1 \cdot 10^{-9}$ –30	$1 \cdot 10^{-9}$ –30
СКО воспроизведения единицы длины ($n=100$) на длине волны:		
633 нм	$5,6 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$
633* нм	–	$6,2 \cdot 10^{-12}$
532 нм	–	$1,3 \cdot 10^{-12}$
НСП воспроизведения единицы длины на длине волны:		
633 нм	$2,2 \cdot 10^{-12}$	$1,9 \cdot 10^{-12}$
633* нм	–	$1,0 \cdot 10^{-11}$
532 нм	–	$1,6 \cdot 10^{-12}$
u_A ($n=100$) на длине волны:		
633 нм	$5,6 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$
633* нм	–	$6,2 \cdot 10^{-12}$
532 нм	–	$1,3 \cdot 10^{-12}$
u_B на длине волны:		
633 нм	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$7,8 \cdot 10^{-13}$
633* нм	–	$4,2 \cdot 10^{-12}$
532 нм	–	$6,5 \cdot 10^{-13}$
Суммарная стандартная неопределённость на длине волны:		
633 нм	$5,8 \cdot 10^{-12}$	$1,8 \cdot 10^{-12}$
633* нм	–	$7,5 \cdot 10^{-12}$
532 нм	–	$1,5 \cdot 10^{-12}$
Расширенная неопределённость на длине волны:		
633 нм	$1,16 \cdot 10^{-11}$	$3,6 \cdot 10^{-12}$
633* нм	–	$1,5 \cdot 10^{-11}$
532 нм	–	$3,0 \cdot 10^{-12}$
Диапазон передачи единицы длины источникам лазерного излучения, нм	–	500–1050
СКО передачи единицы длины с помощью интерферометра гетеродинного и компаратора лазерного интерференционного для измерений длины в субмикрометровом и нанодиапазоне ($n=10$) ($1 \cdot 10^{-9}$ – $1 \cdot 10^{-4}$) м, нм	0,1	0,1
СКО передачи единицы длины с помощью компаратора универсального интерференционного метрового ($n=10$) ($1 \cdot 10^{-6}$ –1) м, мкм	0,03	0,03
СКО передачи единицы длины с помощью компаратора лазерного интерференционного тридцатиметрового ($n=10$) ($5 \cdot 10^{-9}$ –30) м, мкм	5	5

Примечание. *Транспортируемый лазер.

систематической погрешности (НСП) и стандартной неопределённости по типу В u_B , а также СКО и стандартная неопределённость по типу А u_A для каждого из источников эталонного излучения. Результаты исследований He-Ne/I₂-лазера и Nd:YAG-лазера представлены в табл. 1, 2.

Передача единицы длины от ГЭТ 2-2021 источникам лазерного излучения осуществляется с помощью установки и комплекса.

При использовании для передачи единицы длины установки частота излучения исследуемого лазера определяется методом оптического гетеродинамирования. Сигнал с фотоприёмника поступает на усилитель сигнала, а затем на частотомер и анализатор спектра. Данные с анализатора спектра и частотомера поступают на персональный компьютер. В состав ГЭТ 2-2021 введены оптомеханические и электронные компоненты, а также разработано программное обеспечение «Лазер-Лазер», позволившее автоматизировать процесс измерений и уменьшить время их проведения [9].

С целью расширения диапазона передачи единицы длины лазерным источникам излучения в состав ГЭТ 2-2021 включён комплекс, который реализует передовую измерительную технологию на основе оптической частотной гребёнки (КОМБ-генератор) фирмы «Menlo Systems GmbH», Германия [10–14]. Для формирования высокостабильного спектрально чистого опорного сигнала частотой 5 МГц для оптической частотной гребёнки применяется водородный стандарт частоты и времени Ч1-1003М производства ЗАО «Время-Ч», Россия, что обеспечивает связь ГЭТ 2-2021 с Государственным первичным эталоном единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018.

Стабильность частоты оптической гребёнки определяется стабильностью выходного сигнала водородного стандарта частоты, характеризуемого средним квадратическим относительным двухвыборочным отклонением частоты при полосе пропускания 3 Гц, и составляет $0,5 \cdot 10^{-15}$ в сутки. Результаты измерений обрабатываются с помощью специализированного программного обеспечения «СОМВ-Лазер» [9].

В ходе работ по совершенствованию были проведены исследования метрологических характеристик компараторов для передачи единицы длины материальным мерам длины и применяемым в качестве рабочих эталонов приборам и подтверждена их стабильность за последние десять лет.

Сравнение метрологических характеристик ГЭТ 2-2010 и ГЭТ 2-2021. Сравнение характеристик ГЭТ 2-2010 [15] и

ГЭТ 2-2021 приведено в табл. 3. Метрологические характеристики ГЭТ 2-2021 улучшены и соответствуют современным требованиям, предъявляемым наукой и различными отраслями промышленности.

Международные сличения. ВНИИМ постоянно участвует в международных сличениях в области измерений геометрических величин, таких как сличения первичных эталонов единицы длины по теме BIPM.L-K11, сличения установок для

измерений концевых мер длины по темам CCL-K1, CCL-K2, сличения установок для измерений штриховых мер длины по теме EUROMET.L-K7 и др.

Выводы. Проведённые работы позволили расширить функциональные возможности эталона и улучшить его метрологические характеристики. Воспроизведение единицы длины на длине волны 633 нм стало возможным с СКО $1,6 \cdot 10^{-12}$, на длине волны 532 нм – с СКО $1,3 \cdot 10^{-12}$. Включение в состав эталона транспортируемого источника эталонного лазерного излучения с длиной волны 633 нм позволяет передавать единицу длины стационарным высокоточным лазерным системам с СКО $6,2 \cdot 10^{-12}$. С помощью комплекса на основе оптической частотной гребёнки осуществляется передача единицы длины в диапазоне от 500 до 1050 нм. Реализация данных задач позволяет сохранить метрологический суверенитет РФ и обеспечить соответствие метрологических характеристик лучшим мировым аналогам.

Перспективы дальнейшего совершенствования ГЭТ 2-2021 связаны с развитием технологий создания оптических частотных гребёнок и высокоточных лазерных систем на различных длинах волн.

Список источников

1. Recommended values of standard frequencies for the metre. URL: <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies-metre> (дата обращения: 15.10.2021).
2. Александров В. С., Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Лейбенгард Г. И., Федорин В. Л., Чекирда К. В. Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2010 // Измерительная техника. 2012. № 6. С. 3–7.
3. Kononova N. A., Zakharenko Yu. G., Fedorin V. L., Fomkina Z. V., *Investigations of metrological characteristics of the "Winters Electro-Optics, Inc." iodine-stabilized He-Ne laser by The State Primary Standard of the Unit of Length – GET 2-2010, 18th International Conference on Laser Optics ICLO 2018*, St. Petersburg, p. 56.
4. Денисов В. И., Игнатович С. М., Квашнин Н. Л., Скворцов М. Н., Фарносов С. А. Прецизионная модуляция лазерного излучения акустооптическим модулятором для стабилизации Nd:YAG-лазера по оптическим резонансам в молекулярном йоде // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 5. С. 464–467.
5. Скворцов М. Н., Охалкин М. В., Невский А. Ю., Багаев С. Н. Оптический стандарт частоты на основе Nd:YAG-лазера, стабилизированного по резонансам насыщенного поглощения в молекулярном йоде с использованием второй гармоники излучения // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 12. С. 1101–1106.
6. Peter Jungner, Mark L. Eickhoff, Steve D. Swartz, Jun Ye, John L. Hall, Steeve B. Waltman, *Proc. SPIE 2378, Laser Frequency Stabilization and Noise Reduction*, 1995, vol. 2378, pp. 22–34. <https://doi.org/10.1117/12.208229>
7. Holzwarth R., Nevsky A. Yu., Zimmermann M., Udem Th., Hansch T. W., Von Zanthier J., Walther H., Knight J. C., Wadsworth W. J., Russell P. St. J., Skvortsov M. N., Bagayev S. N.,

Absolute frequency measurement of iodine lines with a femtosecond optical synthesizer, *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2001, vol. 73(3), pp. 269–271.

8. Игнатович С. М., Квашнин Н. Л., Скворцов М. Н. Сдвиг частоты иодного оптического стандарта частоты в зависимости от величины пробной модуляции частоты излучения, давления и температуры газа в поглощающей ячейке // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 10. С. 973–976.

9. Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Фомкина З. В., Чекирда К. В., Лукин А. Я. Разработка прикладного программного обеспечения для комплекса аппаратных средств высшей точности для воспроизведения и передачи единицы длины // Приборы. 2018. № 12(222). С. 42–47.

10. Холл Дж. Л. Определение и измерение оптических частот: перспективы оптических часов и не только // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 12. С. 1353–1367. <https://doi.org/10.3367/UfNr.0176.200612i.1353>

11. Хэнш Т. В. Страсть к точности // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 12. С. 1368–1380. <https://doi.org/10.3367/UfNr.0176.200612j.1368>

12. Tsaturian V., *Femtosecond combs for optical frequency metrology*, 2013, available at: https://www.ros.hw.ac.uk/bitstream/handle/10399/2747/TsaturianV_0314_eps.pdf?sequence=1 (accessed: 15.03.2021).

13. Sizmann A., Fischer M., Holzwarth R. Calibration System based on a Laser Frequency Comb. Interim Report to ESO Version 0.1. Menlo Systems GmbH. 2006. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.eso.org/~lpasquin/permarco/Interim Report Calibration System V0.1 20.06.06.pdf](http://www.eso.org/~lpasquin/permarco/Interim%20Report%20Calibration%20System%20V0.1%2020.06.pdf) (дата обращения: 15.03.2021).

14. Ye J., Schnatz H., Hollberg L. W., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, vol. 9. no. 4, pp. 1041–1058. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2003.819109>

15. Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Федорин В. Л., Фомкина З. В., Чекирда К. В. Перспективы развития эталонной базы Российской Федерации в области измерений длины // Измерительная техника. 2020. № 2. С. 3–5. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-2-3-5>

References

1. Recommended values of standard frequencies for the metre, available at: <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies-metre> (accessed: 15.10.2021).
2. Alexandrov V. S., Zakharenko Yu. G., Kononova N. A., Leibengardt G. I., Fedorin V. L., Chekirda K. V., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 55, no. 6, pp. 595–602. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-0007-y>
3. Kononova N. A., Zakharenko Yu. G., Fedorin V. L., Fomkina Z. V., *Investigations of metrological characteristics of the "Winters Electro-Optics, Inc." iodine-stabilized He-Ne laser by The State Primary Standard of the Unit of Length – GET 2-2010, 18th International Conference on Laser Optics ICLO 2018*, St. Petersburg, p. 56.
4. Denisov V. I., Ignatovich S. M., Kvashnin N., Skvortsov M. N., *Quantum Electronics*, 2016, vol. 46, no. 5, pp. 464–467. <http://dx.doi.org/10.1070/QEL16015>

5. Skvortsov M. N., Okhapkin M. N., Nevskii A. Yu., Bagayev S. N., *Quantum Electronics*, 2004, vol. 34(12), pp. 1101–1106. <http://dx.doi.org/10.1070/QE2004v034n12ABEH002851>
6. Peter Jungner, Mark L. Eickhoff, Steve D. Swartz, Jun Ye, John L. Hall, Steave B. Waltman, *Proc. SPIE 2378, Laser Frequency Stabilization and Noise Reduction*, 1995, vol. 2378, pp. 22–34. <https://doi.org/10.1117/12.208229>
7. Holzwarth R., Nevsky A. Yu., Zimmermann M., Udem Th., Hansch T. W., Von Zanthier J., Walther H., Knight J. C., Wadsworth W. J., Russell P. St. J., Skvortsov M. N., Bagayev S. N., Absolute frequency measurement of iodine lines with a femtosecond optical synthesizer, *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2001, vol. 73(3), pp. 269–271.
8. Ignatovich S. M., Kvashnin N., Skvortsov M. N., *Quantum Electronics*, 2018, vol. 48(10), pp. 973–976. <http://dx.doi.org/10.1070/QEL16609>
9. Zakharenko Yu. G., Kononova N. A., Fomkina Z. V., Chekirda K. V., Lukin A. Ya., Development of application program for a complex of high-precision hardware instruments for reproduction and transmission of the unit of length, *Instruments*, 2018, no. 12(222), pp. 42–47. (In Russ.)
10. Hall J. L., Definition and measurement of optical frequencies: perspectives of optical clocks – and not only, *Phys. Usp.*, 2006, vol. 176, no. 12, pp. 1353–1367. (In Russ.) <https://doi.org/10.3367/UFNr.0176.200612i.1353>
11. Hensh T. V., Passion for accuracy, *Phys. Usp.*, 2006, vol. 176, no. 12, pp. 1368–1380. (In Russ.) <https://doi.org/10.3367/UFNr.0176.200612j.1368>
12. Tsaturian V., *Femtosecond combs for optical frequency metrology*, 2013, available at: https://www.ros.hw.ac.uk/bitstream/handle/10399/2747/TsaturianV_0314_eps.pdf?sequence=1 (accessed: 15.03.2021).
13. Sizmann A., Fischer M., Holzwarth R., *Calibration System based on a Laser Frequency Comb. Interim Report to ESO, Version 0.1, Menlo Systems GmbH*, 2006, available at: http://www.eso.org/~lpasquin/permarco/Interim_Report_Calibration_System_V0.1_20.6.06.pdf (accessed: 15.03.2021).
14. Ye J., Schnatz H., Hollberg L. W., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 1041–1058. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2003.819109>
15. Zakharenko Yu. G., Kononova N. A., Fedorin V. L., Fomkina Z. V., Chekirda K. V., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 77–80. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01753-9>

Статья поступила в редакцию 24.05.2021; одобрена после рецензирования 09.06.2021; принята к публикации 09.06.2021.
 The article was submitted 24.05.2021; approved after reviewing 09.06.2021; accepted for publication 09.06.2021.

Научная статья

УДК 533.6.071.8:532.57

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-8-13>

Статическая составляющая температурной погрешности тензометрических весов: определение коэффициента температурной чувствительности

Антон Роальдович Горбушин¹, Екатерина Александровна Крапивина², Марина Николаевна Тытык³✉

¹ Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия, gorbushin.ar@mipt.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4186-588X>

^{1, 2, 3} Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского, Жуковский, Московская обл., Россия

²ekaterina.krapivina@tsagi.ru

³marina.tytyk@tsagi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6499-9384>

Аннотация. При экспериментальных исследованиях моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах используются высокоточные тензометрические весы, точность показаний которых зависит от температуры. Проанализированы и количественно оценены основные физические факторы, обуславливающие изменение показаний тензометрических весов под воздействием температуры. Рассмотрено влияние статической составляющей температурной погрешности на показания тензометрических весов. Описан метод введения температурных поправок к показаниям тензометрических весов с помощью коэффициента температурной чувствительности. Разработан метод определения коэффициента температурной чувствительности, применяемый в процессе испытаний в аэродинамических трубах в случае отсутствия специализированного калибровочного стенда с термокамерой. Описаны экспериментальное оборудование и процесс исследования шестикомпонентных внутримодельных тензометрических весов и количественно определено влияние статической составляющей температуры на их показания. Характерное значение коэффициента температурной чувствительности составило приблизительно 0,04 %/°C. Изменение показаний тензометрических весов при изменении их температуры на 3–4 °C превышает стандартное отклонение, полученное при калибровке весов. Это изменение показаний является систематической температурной погрешностью тензометрических весов и должно быть исключено из результатов измерений нагрузок весами в виде поправки к коэффициенту чувствительности или электрическому сигналу. Метод определения коэффициента температурной чувствительности компонент силы весов верифицирован результатами взвешивания модели летательного аппарата и метрических частей продольной и нормальной компонент силы весов в аэродинамической трубе.

Ключевые слова: аэродинамическая труба, модель летательного аппарата, тензометрические весы, температурная погрешность

Для цитирования: Горбушин А. Р., Крапивина Е. А., Тытык М. Н. Статическая составляющая температурной погрешности тензометрических весов: определение коэффициента температурной чувствительности // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 8–13. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-8-13>

Static component of the temperature error of the strain-gauge balance: determination of the temperature sensitivity coefficient

Anton R. Gorbushin¹, Ekaterina A. Krapivina², Marina N. Tytyk³✉

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow region, Russia, gorbushin.ar@mipt.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4186-588X>

^{1, 2, 3} Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Moscow region, Russia

²ekaterina.krapivina@tsagi.ru

³marina.tytyk@tsagi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6499-9384>

Abstract. High precision strain gauge balances are used for the testing of the aircraft models in wind tunnels. The precision of the strain gauge balances depends on the balance temperature. The basic physical factors affecting the balance readings with temperature variation are reviewed and estimated. We considered the effect of static component of the temperature error on the readings of the strain gauge balance. A method of application of temperature corrections to the balance readings by means of the temperature sensitivity coefficient is described. We developed the method of determining coefficient of temperature sensitivity of balance components during a fulfilment of the test campaign in a wind tunnel. The experimental equipment and the experimental investigations carried out are described. The experimental results of determining the effect of the static temperature component on the readings of six-component balance are presented. Characteristic value of the sensitivity coefficient was found to be approximately 0.04 %/°C.

It is shown that the standard deviation of the balance readings exceeds the balance calibration standard deviation when the balance temperature varies more than 3–4 °C. The temperature systematic error has to be excluded from results of the balance measurement in the form of correction to the sensitivity coefficient or electrical signal. The method was verified by the results of measurement of the weight of the aircraft model and the weight of the metric parts of the strain-gauge balance's longitudinal and normal force components in the wind tunnel.

Keywords: wind tunnel, aircraft model, strain-gauge balance, temperature error

Введение. Измерение силового воздействия потока газа на модели летательных аппаратов представляет одну из основных задач экспериментальных исследований в аэродинамических трубах. Результатом измерений являются суммарные и распределённые аэродинамические нагрузки, действующие на модели и их элементы. Суммарные нагрузки измеряются многокомпонентными аэродинамическими весами. В аэродинамическом эксперименте широко используются высокоточные тензометрические весы (многокомпонентные тензометрические динамометры) [1–4]. Средние квадратические отклонения (СКО) результатов измерений однокомпонентными динамометрами, отнесённые к половине диапазона измерения, составляют 0,01–0,02 %, а шестикомпонентными – 0,05–0,30 % [1, 3–5]. В России тензометрические весы используются с конца 1940-х гг. [4]. В настоящее время шестикомпонентные тензометрические весы обеспечивают случайную погрешность коэффициента сопротивления при повторных испытаниях в аэродинамических трубах на уровне $\pm(0,00005–0,0001)$ (см., например, [6, 7]), что соответствует требованиям к погрешности определения аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов [8–10]. Тензометрические весы состоят из чувствительного элемента сложной геометрии, на поверхность которого наклеивают тензорезисторы. Для увеличения чувствительности и уменьшения влияния температуры тензорезисторы объединяют в мост Уитстона. Рядом с тензорезисторами наклеивают датчики температуры для учёта влияния температуры на показания тензометрических весов.

В аэродинамических трубах во время испытаний может повышаться или понижаться температура потока. В результате в весах возникают пространственно-временные градиенты температуры, которые влияют на показания тензомостов. Известны следующие физические факторы, обуславливающие воздействия температуры на показания тензометрических весов (например, см. [11], *Measuring with strain gauges: how to prevent unwanted temperature effects on your measurement result*. URL: <https://www.hbm.com/en/6725/article-temperature-compensation-of-strain-gauges/>):

расширение чувствительного элемента весов при изменении температуры;

изменение сопротивления соединительных проводов;

изменение коэффициента чувствительности тензорезистора;

изменение модуля Юнга материала, из которого изготовлен чувствительный элемент весов (для сталей порядка –0,02 %/°C);

самонагрев тензорезисторов, при котором могут различаться температуры резистора и чувствительного элемента весов;

уменьшение жёсткости клеевого состава при повышении температуры, что проявляется в виде кажущегося уменьшения коэффициента чувствительности тензорезистора.

Все эти факторы приводят к изменению показаний тензомостов и, соответственно, к изменению коэффициентов чувствительности тензометрических весов.

Диапазон влияния температуры на выходной сигнал тензорезисторов разных типов составляет –0,035...+0,010 %/°C [11].

Температурную погрешность можно условно разделить на две составляющие – статическую и динамическую. В работе [12] предложен один из способов учёта динамической погрешности, обусловленной пространственными градиентами температуры. Статическая составляющая температурной погрешности проявляется при стационарном тепловом режиме работы весов, когда температура всех элементов изменяется одновременно без градиентов.

Цель настоящей статьи – исследовать влияние статической составляющей температурной погрешности на показания тензометрических весов и предложить метод учёта этой составляющей путём введения поправки к коэффициенту температурной чувствительности компонент весов. Метод применяется непосредственно в процессе испытаний в аэродинамических трубах при отсутствии специализированного калибровочного стенда с термокамерой.

Метод введения поправок к показаниям тензометрических весов на статическую составляющую температурной погрешности. Наибольшее распространение получили уравнения измерения тензометрических весов, связывающие приложенную нагрузку с электрическими сигналами тензомостов, в виде полинома 2-й степени [2, 5, 13]:

$$X_i = a_i N_i + \sum_{j=1, j \neq i}^6 a_{ij} X_j + \sum_{r=1}^6 \sum_{s=r}^6 a_{rs}^i X_r X_s, \quad (1)$$

где X_i – нагрузка по i -й компоненте весов; a_i – коэффициент чувствительности i -й компоненты; N_i – выходной сигнал i -й компоненты весов; a_{ij} – коэффициент i -й строки матрицы линейных взаимных влияний компонентов; a_{rs}^i – коэффициент i -й строки матрицы нелинейных взаимных влияний компонентов; j, r, s – индексы суммирования.

Компонентам силы X, Y, Z (X – продольная, Y – нормальная, Z – поперечная) соответствуют значения $i=1, 2, 3$, а компонентам момента M_x, M_y, M_z – значения $i=4, 5, 6$. Уравнение (1) без последних двух сумм представляет собой закон Гука, поскольку электрический сигнал пропорционален деформации, а коэффициент a_i представляет собой коэффициент жёсткости (упругости) компоненты весов и линейно связан с модулем Юнга материала, из которого изготовлены весы. Члены, представленные двумя суммами в правой части уравнения (1), есть взаимные влияния компонент. Эти члены существенно меньше диагональных членов (первый член в правой части уравнения (1)) [1–5].

В работе [2] приведено выражение для определения поправки к электрическим сигналам тензометрических весов в уравнении измерения (1) на влияние статической составляющей температуры:

$$N_i^c = N_i / [1 + k_i(t - t_k)], \quad (2)$$

где N_i^c – электрический сигнал i -й компоненты весов с поправкой; k_i – коэффициент температурной чувствительности; t – температура весов; t_k – температура весов при их калибровке.

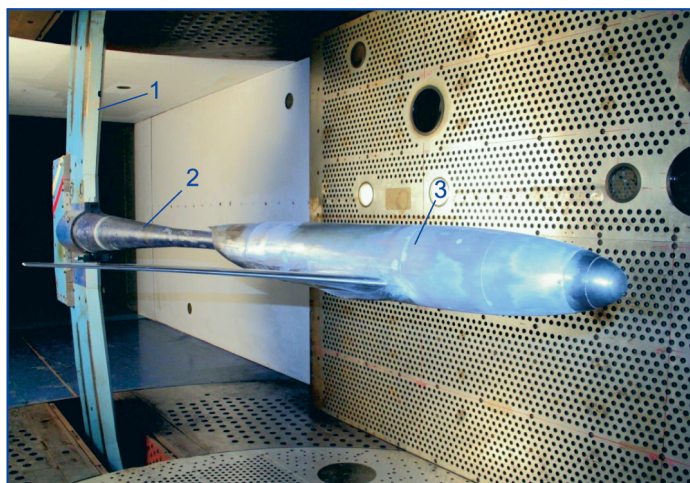


Рис. 1. Модель самолета в рабочей части трансзвуковой аэродинамической трубы Т-128:

1 – серповидная стойка; 2 – хвостовое поддерживающее устройство; 3 – модель самолета

Fig. 1. Aircraft model in the test section of the T-128 transonic wind tunnel:
1 – pitch sector; 2 – rear sting; 3 – aircraft model

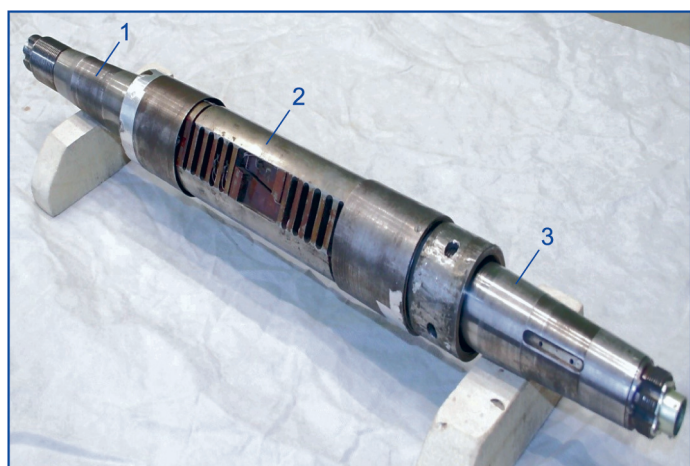


Рис. 2. Внутримодельные шестикомпонентные тензометрические весы 6ЭВ-128-1:

1, 3 – элементы крепления соответственно модели и весов; 2 – чувствительный элемент

Fig. 2. Six-component internal strain-gauge balance 6EB-128-1:
1 – model-fixed balance part; 2 – a sensitive element; 3 – earth part of the balance

Изменение модуля Юнга материала чувствительного элемента весов от температуры приводит к изменению коэффициента чувствительности a_i уравнения (1). Следовательно, поправку на изменение модуля Юнга материала от температуры следует вводить к коэффициенту чувствительности. Математически все поправки можно объединить в одну и вводить их или к электрическому сигналу, как это предложено в [2], или к коэффициенту чувствительности, как это будет сделано ниже.

Метод определения коэффициента температурной чувствительности тензометрических весов. Классический метод определения коэффициента температурной чувствительности заключается в калибровке тензометрических весов на калибровочном стенде с термокамерой, которая позволяет варьировать температуру весов. Такими стендами оборудуются, как правило, криогенные аэродинамические трубы [1, 14–16]. Ниже предложен метод определения коэффициента температурной чувствительности тензометрических весов, когда отсутствует специализированный калибровочный стенд с термокамерой.

В работе [17] описан метод одновекторной калибровки тензометрических весов и устройство для калибровки, которое позволяет прикладывать нагрузки к компонентам весов посредством вращения весов по углам тангажа и крена с прикреплённым к весам грузом. В настоящей работе для определения систематической температурной погрешности тензометрических весов в рабочей части аэродинамической трубы применили метод одновекторной калибровки. Для этого в ЦАГИ провели эксперимент. На рис. 1 показана использованная в качестве груза модель 3 самолёта в рабочей части трансзвуковой аэродинамической трубы Т-128. В общем случае при экспериментах в аэродинамической трубе можно использовать модели любых летательных аппаратов.

На рис. 2 представлена модель внутримодельных шестикомпонентных тензометрических весов ЦАГИ 6ЭВ-128-1. На элементе крепления 1 модели весов устанавливали модель самолета. Элемент крепления весов 3 закрепляли в хвостовом поддерживающем устройстве, смонтированном в серповидной стойке (см. рис. 1, поз. 1, 2). Серповидная стойка с помощью специального механизма перемещала модель самолёта вместе с тензометрическими весами по углу тангажа в рабочей части аэродинамической трубы Т-128.

На компоненты силы тензометрических весов действуют составляющие веса модели самолёта и собственного веса метрической части компонент весов. Метрическая часть компоненты весов представляет собой элемент крепления модели и часть чувствительного элемента 2 весов (см. рис. 2), которая расположена между элементом крепления модели и местом наклейки тензорезисторов компоненты. Веса модели самолёта и метрических частей компонент весов определяли методом, разработанным в [18], с использованием следующих выражений:

$$X = (G_m + G_x) \sin \theta; \quad (3)$$

$$Y = G_y - (G_m + G_y) \cos \theta \cos \gamma; \quad (4)$$

$$Z = (G_M + G_Z) \cos \theta \sin \gamma, \quad (5)$$

где G_M – вес модели; G_X , G_Y , G_Z – веса метрических частей компонент силы весов X , Y , Z соответственно; θ , γ – углы тангажа и крена весов соответственно.

Для определения температурного коэффициента чувствительности k_i отбросим две суммы в правой части уравнения (1), в которых не содержатся ни электрические сигналы, ни коэффициенты чувствительности. Тогда уравнение (1) преобразуется с учётом (2) к виду

$$X_i^c = a_i N_i / [1 + k_i(t - t_k)] = X_i / [1 + k_i(t - t_k)], \quad (6)$$

где X_i^c – нагрузка по i -й компоненте с температурной поправкой.

В уравнениях (3), (5) вес модели G_M линейно связан с компонентами силы X ($i=1$), Z ($i=3$). Поэтому по аналогии с уравнением (6) запишем

$$G_M^0 + G_i^0 = (G_M + G_i) / [1 + k_i(t - t_k)], \quad (7)$$

где G_M^0 – вес модели самолёта при температуре весов, равной температуре при их калибровке; G_i^0 – вес метрической части i -й компоненты весов при температуре калибровки; G_i – вес метрической части i -й компоненты весов при температуре компоненты t .

Возьмем производную от выражения (7) по температуре и получим выражение для определения коэффициента k_i при $i=1,3$:

$$k_i = \frac{1}{G_M^0 + G_i^0} \frac{d(G_M + G_i)}{dt}. \quad (8)$$

Для компоненты силы Y ($i=2$) упростим выражения (4) для случая нулевых углов тангажа и крена. Тогда выражение для определения коэффициента k_2 примет вид

$$k_2 = \frac{1}{G_M^0} \frac{dG_M}{dt}. \quad (9)$$

Экспериментальное оборудование. Экспериментальные исследования проводили на внутримодельных шестикомпонентных тензометрических весах ЦАГИ 6ЭВ-128-1 (см. рис. 2), изготовленных из единой заготовки высокопрочной стали марки ВЛ1. Модуль Юнга этого материала изменяется на $-0,014 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ при изменении температуры в диапазоне $20\text{--}200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [19]. Диапазон измерений D компонент силы весов, СКО результатов измерений от среднего значения при калибровке (в ньютонах) и СКО, отнесённое к половине диапазона измерений (в процентах), представлены в табл. 1.

Температура весов в процессе калибровки составляла $t_k = 23,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Для измерения угла тангажа использовали акселерометр А-17 (АО «ИТТ», Россия) с погрешностью $\pm 0,001^{\circ}$ [6]. Для измерения

температуры на поверхность чувствительного элемента весов (см. рис. 2) вблизи тензорезисторов наклеивали термометры сопротивления Pt100 (Heraeus, Германия) [6]. Сигналы весов регистрировались прецизионными платами ML-38 измерительной системы MGCplus (Hottinger Brüel & Kjaer GmbH, Германия) с приведённой погрешностью $0,0025 \text{ } \%$ [6], а сигналы термометров сопротивления и акселерометра – платами ML-35 и ML-01 с приведённой погрешностью $0,03 \text{ } \%$. Схема подключения тензометрических весов, акселерометров и термометров сопротивления к измерительной системе аналогична приведённой в работе [6].

Экспериментальные исследования. Параметры весов определяли в двух экспериментах методом, разработанным в [18].

Определение веса метрических частей весов. На специальном стенде весы перемещались по углам тангажа и крена. Значения веса метрических частей компонент силы весов с соответствующими СКО результатов измерений приведены в табл. 2. Измерения проводили при той же температуре весов, что и при их калибровке. Благодаря высокой точности измерения угла тангажа и высокой точности измерительной системы погрешности измерений компонент силы X , Y на порядок меньше, чем СКО, полученные при калибровке весов (см. табл. 1).

Определение веса модели самолёта при различной температуре весов. Эксперимент проводили многократно между повторными испытаниями модели самолёта в одном состоянии в трансзвуковой аэродинамической трубе ЦАГИ Т-128 при изменении угла тангажа модели и весов. Температура весов в процессе испытаний изменялась с изменением температуры потока. Угол крена весов составил $1,79^{\circ}$. Угол тангажа весов варьировался в диапазоне $-26 \dots +28^{\circ}$ с шагом 2° . Суммарный вес модели и метрической части компонент весов определяли методом наименьших квадратов (МНК).

Результаты исследований. Результаты измерения суммарного веса модели и метрической части компоненты силы X весов в зависимости от температуры компоненты приведены на рис. 3 (кривая 1). СКО результатов определения веса с помощью МНК примерно в пять раз меньше СКО компоненты X , полученного при калибровке (см. табл. 1). Изменение суммарного веса модели и метрической части продольной компоненты X составило примерно 8 Н в исследованном диапазоне температур, что превышает СКО компоненты, указанное в табл. 1. Следовательно, эту систематическую погрешность следует определить и исключить из результатов измерений. Влияние температуры на показания компоненты силы X

Таблица 1

Диапазон измерений компонент силы весов и СКО, полученные при калибровке

Компонента	D , кН	СКО, Н	СКО, %
X	± 2	3,2	0,16
Y	± 20	4,0	0,02
Z	± 2	1,0	0,05

Таблица 2

Вес метрических частей компонент силы тензометрических весов и СКО результатов их измерений

Метрическая часть	Вес, Н	СКО, %
G_X	85,10	0,15
G_Y	85,30	0,30
G_Z	85,62	0,40

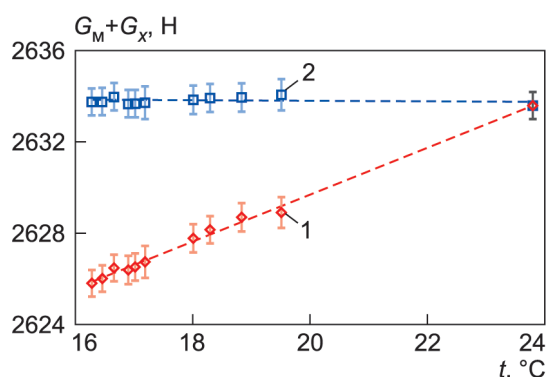


Рис. 3. Зависимость суммарного веса модели и метрической части весов, определённой компонентой силы X , от температуры компоненты: 1 – исходные данные; 2 – данные с поправкой на влияние температуры

Fig. 3. Sum of the weights of the model and metric part of the balance, measured by X component, as a function of temperature of the component: 1 – the raw data; 2 – the data with temperature corrections

тензометрических весов описывается линейной функцией и соответствует математической модели (7). С помощью МНК определим производную $d(G_M + G_X)/dt = 1,027 \pm 0,024 \text{ Н/}^\circ\text{C}$. В результате по формуле (8) получим коэффициент температурной чувствительности $k_X = (0,00039 \pm 0,00001) (^\circ\text{C})^{-1}$ для компоненты X . Значение коэффициента сопоставимо с уровнем влияния температуры на элементы тензометрических весов, приведённым во введении. На рис. 3 приведены также данные с введённой поправкой на влияние статической составляющей температуры для верификации метода и справедливости сделанного предположения об отбрасывании двух сумм в правой части уравнения измерения (1). Суммарный вес модели самолёта и метрической части весов с введённой поправкой на влияние температуры постоянен в пределах СКО измерений.

Аналогичные результаты для компоненты силы Y приведены на рис. 4. СКО измерения веса модели получились приблизительно в 2,5 раза меньше СКО компоненты Y , полученного при калибровке весов (см. табл. 1). Влияние температуры на показания компоненты Y силы тензометрических весов также представляет собой линейную функцию с коэффициентом $dG_M/dt = 1,066 \pm 0,056 \text{ Н/}^\circ\text{C}$, что соответствует коэффициенту температурной чувствительности $k_Y = (0,00042 \pm 0,00002) (^\circ\text{C})^{-1}$. Вес модели с температурной поправкой в пределах СКО измерений получился постоянным. Значение коэффициента k_Y получилось практически таким же, как и k_X . Этого и следовало ожидать, поскольку тензометрические весы сделаны из единой заготовки и использованы одинаковые для всех компонент тензорезисторы и технология их наклейки. СКО определения коэффициента k_Y в два раза больше, чем погрешность k_X . Это объясняется двумя обстоятельствами. Первое – СКО измерений компонентой Y больше, чем СКО измерений компонентой X (см. табл. 1). Второе обстоятельство следует из функциональных зависимостей от угла тангажа продольной (3) и нормальной (4) компонент силы: изменение продольной силы при изменении угла тангажа в исследуемом

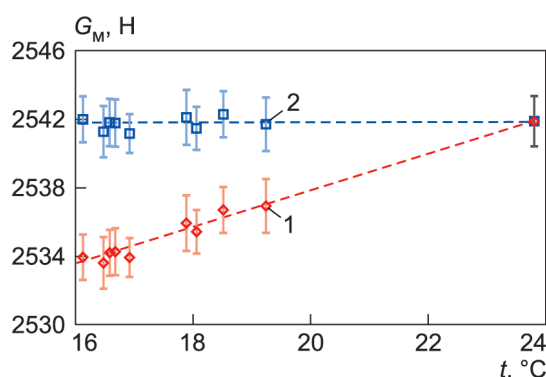


Рис. 4. Зависимость веса модели, определённой компонентой силы Y , от температуры компоненты; 1, 2 – те же, что на рис. 3

Fig. 4. Weight of the model, measured by Y component, as a function of the temperature of the component; 1, 2 – the same as in fig. 3

диапазоне больше, чем изменение нормальной силы. Значения коэффициентов температурного влияния k_X , k_Y , полученные в настоящем исследовании, близки к значениям, полученным другими исследователями и приведённым во введении.

Влияние температуры на показания компоненты силы Z при таком положении весов (угол крена весов $1,79^\circ$) не определяется, поскольку малы изменения показаний компоненты Z при изменении угла тангажа, как следует из выражения (5).

Заключение. Разработанный метод позволяет определять коэффициент статической температурной чувствительности компонент силы весов непосредственно в процессе испытаний в аэродинамических трубах в случае, когда отсутствует специализированный калибровочный стенд с термокамерой. Характерное значение коэффициента температурной чувствительности составляет приблизительно $0,04 \text{ \%}/^\circ\text{C}$, что согласуется с результатами других исследователей. Проведённые исследования показали, что при изменении температуры весов более чем на $3\text{--}4 \text{ }^\circ\text{C}$ от температуры их калибровки статическая составляющая температурной погрешности превышает погрешности тензометрических весов. Температурная погрешность является систематической и её следует исключать из результатов измерений посредством введения поправки.

Список источников

1. Ewald B. F. R., *Measurement Science and Technology*, 2000, vol. 11, no. 6, pp. 81–94. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/6/201>
2. Calibration and Use of Internal Strain-Gage Balances with Application to Wind Tunnel Testing, *AIAA Rec. Practice*, 2020 AIAA R-091A-2020. <https://doi.org/10.2514/4.106019.001>
3. Богданов В. В., Волобуев В. С. Многокомпонентные тензометрические весы // Датчики и системы. 2004. № 3. С. 3–9.
4. Волобуев В. С., Горбушин А. Р. Первые аэродинамические весы России // Труды ЦАГИ. 2015. Вып. 2744. С. 1–30.
5. Rhew R., Parker P., *33rd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conferenc*, 5–9 June 2017, Denver, Colorado, AIAA 2017-4427. <https://doi.org/10.2514/6.2017-4427>

6. Буров В. В., Волобуев В. С., Глазков С. А., Чумаченко Е. К. Измерительно-вычислительный комплекс трансзвуковой аэродинамической трубы Т-128 // Датчики и системы. 2010. № 5 (132). С. 20–24.
7. Rivers M. B., Rudnik R., Quest J., 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech, 5–9 January 2015, Kissimmee, Florida, AIAA 2015-1093. <https://doi.org/10.2514/6.2015-1093>
8. Wood M. N., Capps D. S., The accurate measurements of drag in the 8 FT×8 FT tunnel, *Aerodynamic data accuracy and quality: requirements and capabilities in wind tunnel testing*, AGARD Conferences Proceeding 429, 1985, p. 9.
9. Frank L., Experience relative to the interaction between balance engineer and the project engineer with regard to measurement uncertainty, *Proceedings of a symposium sponsored by the National Aeronautics and Space Administration*, Washington, D.C., Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA, October 22–25, 1996, NASA/CP-1999-209101/PT1, pp. 243–277.
10. Бухаров К. Д., Горбушин А. Р., Карташев Ю. В., Петровневич В. В., Судакова И. А., Чернышев С. Л. Аprobация весового непрерывного эксперимента в трансзвуковой аэродинамической трубе Т-128 на дозвуковых режимах // Учёные записки ЦАГИ. 2017. Т. XLVIII. № 7. С. 27–45.
11. Клокова Н. П. Тензорезисторы: Теория, методика расчёта, разработки. М.: Машиностроение, 1990.
12. Богданов В. В., Волобуев В. С., Горбушин А. Р. Исследование тепловой динамики тензометрических весов и разработка методов снижения их температурных погрешностей // Учёные записки ЦАГИ. 2009. Т. XL. № 5. С. 74–81.
13. Волобуев В. С., Горбушин А. Р., Судакова И. А., Тихомиров В. И. Два способа калибровки тензометрических весов на калибровочных стендах ЦАГИ // Учёные записки ЦАГИ. 2017. Т. XLVIII, № 2. С. 62–70.
14. Quest J., Schimanski D., 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 06–09 January 2003, Reno, Nevada, AIAA 2003-755. <https://doi.org/10.2514/6.2003-755>
15. Simpson J., Landman D., Giroux R., Zeisset M., Hall B., Rhew R., 2005 U.S. Air Force T&E Days, 06–08 December 2005, Nashville, Tennessee, AIAA 2005-7601. <https://doi.org/10.2514/6.2005-7601>
16. Toro K., Burns D., Parker P. A., 2018 Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, June 25–29, 2018, Atlanta, Georgia, AIAA 2018-4108. <https://doi.org/10.2514/6.2018-4108>
17. Landman D., Toro K. G., Commo S. A., Lynn K. C., *Journal of Aircraft*, 2015, vol. 52, no. 3. <https://doi.org/10.2514/1.C032930>
18. Горбушин А. Р. Метод учёта влияния веса модели и веса динамометра на показания тензометрических весов // Учёные записки ЦАГИ, 2009. Т. XL. № 4. С. 63–70.
19. Туманов А. Т. Авиационные материалы. Справочник в 9 т. Т. 1. Конструкционные стали. М.: ВИАМ. ОНТИ, 1975.
2. Calibration and Use of Internal Strain-Gage Balances with Application to Wind Tunnel Testing, *AIAA Rec. Practice*, 2020 AIAA R-091A-2020. <https://doi.org/10.2514/4.106019.001>
3. Bogdanov V. V., Volobuev V. S., A multi-component strain-gage balance, *Sensors and Systems*, 2004, no. 3, pp. 3–9. (In Russ.)
4. Volobuev V. S., Gorbushin A. R., Pervye aehrodinamicheskie vesy Rossii, *Trudy TsAGI*, 2015, iss. 2744, pp. 1–30. (In Russ.)
5. Rhew R., Parker P., 33rd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conferenc, 5–9 June 2017, Denver, Colorado, AIAA 2017-4427. <https://doi.org/10.2514/6.2017-4427>
6. Burov V. V., Volobuev V. S., Glazkov S. A., Gorbushin A. R., Chumachenko E. K., *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72, pp. 634–641. <https://doi.org/10.1134/S0005117911030143>
7. Rivers M. B., Rudnik R., Quest J., 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech, 5–9 January 2015, Kissimmee, Florida, AIAA 2015-1093. <https://doi.org/10.2514/6.2015-1093>
8. Wood M. N., Capps D. S., The accurate measurements of drag in the 8 FT×8 FT tunnel, *Aerodynamic data accuracy and quality: requirements and capabilities in wind tunnel testing*, AGARD Conferences Proceeding 429, 1985, p. 9.
9. Frank L., Experience relative to the interaction between balance engineer and the project engineer with regard to measurement uncertainty, *Proceedings of a symposium sponsored by the National Aeronautics and Space Administration*, Washington, D.C., Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA, October 22–25, 1996, NASA/CP-1999-209101/PT1, pp. 243–277.
10. Bukharov K. D., Gorbushin A. R., Kartashev Yu. V., Petrovnech V. V., Sudakova I. A., Chernyshev S. L., *TsAGI Science Journal*, 2017, vol. 48, iss. 7, pp. 627–647. <https://doi.org/10.1615/TsAGISciJ.2018026242>
11. Klokova N. P., *Tenzorezistory: Teoriya, metodika rascheta, razrabotki*, Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. (In Russ.)
12. Bogdanov V. V., Gorbushin A. R., Volobuev V. S., *TsAGI Science Journal*, 2009, vol. 40, iss. 5, pp. 619–629. <https://doi.org/10.1615/TsAGISciJ.v40.i5.80>
13. Volobuev V. S., Gorbushin A. R., Sudakova I. A., Tikhomirov V. I., *TsAGI Science Journal*, 2017, vol. 48, iss. 2, pp. 187–197. <https://doi.org/10.1615/TsAGISciJ.2017021104>
14. Quest J., Schimanski D., 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 06–09 January 2003, Reno, Nevada, AIAA 2003-755. <https://doi.org/10.2514/6.2003-755>
15. Simpson J., Landman D., Giroux R., Zeisset M., Hall B., Rhew R., 2005 U.S. Air Force T&E Days, 06–08 December 2005, Nashville, Tennessee, AIAA 2005-7601. <https://doi.org/10.2514/6.2005-7601>
16. Toro K., Burns D., Parker P. A., 2018 Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, June 25–29, 2018, Atlanta, Georgia, AIAA 2018-4108. <https://doi.org/10.2514/6.2018-4108>
17. Landman D., Toro K. G., Commo S. A., Lynn K. C., *Journal of Aircraft*, 2015, vol. 52, no. 3. <https://doi.org/10.2514/1.C032930>
18. Gorbushin A. R., *TsAGI Science Journal*, 2009, vol. 40, iss. 4, pp. 485–495. <https://doi.org/10.1615/TsAGISciJ.v40.i4.70>
19. Tumanov A. T., *Aviatsionnye materialy*, Handbook in 9 volumes, vol. 1 Konstruktsionnye stali, Moscow, VIAM, ONTI Publ., 1975. (In Russ.)

References

Статья поступила в редакцию 05.04.2021; одобрена после рецензирования 06.07.2021; принята к публикации 13.07.2021.
The article was submitted 05.04.2021; approved after reviewing 06.07.2021; accepted for publication 13.07.2021.

Методы дискретной вейвлет-фильтрации измерительных сигналов: алгоритм выбора метода

Юрий Карлович Тараненко

Частное предприятие «Ликопак», Днепр, Украина, taranen@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4072-011>

Аннотация. При разработке средств измерений с учётом многообразия сигналов и влияющих на погрешности факторов актуальной проблемой является выбор метода дискретной вейвлет-фильтрации измерительных сигналов. Приведены результаты разработки алгоритма выбора метода дискретной вейвлет-фильтрации с учётом характера измерительного сигнала. Исследованы три наиболее распространённых метода дискретной вейвлет-фильтрации с последующим сравнительным анализом для двадцати типов измерительных сигналов. Проанализированы следующие методы вейвлет-фильтрации: с общим порогом для всех уровней декомпозиции; без порога с простым обнулением коэффициентов детализации до момента достижения минимальной среднеквадратичной погрешности фильтрации измерительных сигналов; с универсальным порогом для коэффициентов детализации на каждом уровне декомпозиции. Исследованы измерительные сигналы двадцати типов из библиотеки PyWavelets, к которым аддитивно добавлен некоррелированный нормально распределённый шум с нулевым математическим ожиданием и заданным средним квадратическим отклонением. Критерии для сравнения методов определены для зашумлённых сигналов до фильтрации и для отфильтрованных сигналов. В качестве критериев использованы разность отношений сигнал/шум, разность энтропийных погрешностей, среднеквадратичная погрешность фильтрации и функция измерительного сигнала. Для каждого метода фильтрации критерии сравнения определены из условия минимума среднеквадратичной погрешности, вносимой шумами в измерительный сигнал заданного типа. При выборе метода учитывались как энергетические, так и информационные характеристики сигналов. Циклическим перебором определены параметры фильтрации для достижения минимальной среднеквадратичной погрешности фильтрации. Предложенный алгоритм позволяет определять наиболее эффективные методы дискретной вейвлет-фильтрации в зависимости от характера измерительного сигнала. При этом разработчик решает одновременно две задачи: выбор метода фильтрации и определение параметров фильтрации.

Ключевые слова: среднеквадратичная погрешность, алгоритм численной оптимизации, модельный сигнал, дискретное вейвлет-преобразование, фильтрация шумов, уровень декомпозиции, пороговая фильтрация

Для цитирования: Тараненко Ю. К. Методы дискретной вейвлет-фильтрации измерительных сигналов: алгоритм выбора метода // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 14–20. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-14-20>

Methods of discrete wavelet filtering of measuring signals: an algorithm for choosing a method

Yuri K. Taranenko

Private enterprise "Likopak", Dnipro, Ukraine, taranen@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4072-011>

Abstract. When developing measuring instruments, taking into account the diversity of signals and factors affecting errors, the actual problem is the choice of the method of discrete wavelet filtering of measuring signals. The results of the development of an algorithm for choosing a discrete wavelet filtering method taking into account the nature of the measuring signal are presented. The three most common methods of discrete wavelet filtering are investigated, followed by a comparative analysis of twenty types of measurement signals. The following wavelet filtering methods are analyzed: with a common threshold for all levels of decomposition; without a threshold with a simple zeroing of the detail ratios until the minimum root-mean-square error of filtering the measurement signals is reached; with a universal threshold for the detail ratios at each decomposition level. We examined twenty types of measurement signals from the PyWavelets library, to which we added uncorrelated normally distributed noise with zero expectation and a given standard deviation. Method comparison criteria are defined for noisy signals before filtering and for filtered signals. The difference in signal-to-noise ratios, the difference in entropy errors, the rms filtering error, and the function of the measuring signal were used as criteria. For each filtering method, the comparison criteria are determined from the condition of the minimum root-mean-square error introduced by noise into the measuring signal of this type. When choosing a method, both energy and informational characteristics of signals were taken into account. The filtering parameters are determined by round-robin search to achieve the minimum root-mean-square filtering error. The proposed algorithm makes it possible to determine the most effective methods of discrete wavelet filtering, depending on the nature of the measuring signal. In this case, the developer simultaneously solves two problems: the choice of the filtration method and the determination of the filtration parameters.

Keywords: rms error, numerical optimization algorithm, model signal, discrete wavelet transform, noise filtering, decomposition level, threshold filtering

Введение. Очистка измерительных сигналов от шума методами дискретного вейвлет-разложения – сложная комплексная задача. В основе данных методов лежит пороговая обработка коэффициентов детализации вейвлет-разложения. Развитие указанных методов сводится в основном к поиску пороговой функции в ограниченной области вейвлет-семейства Добеши и двух пороговых функций *soft* и *hard*. В публикации [1] предложена классификация пороговой обработки коэффициентов детализации вейвлет-разложения по трём группам: глобальный, локальный, блочный, причем каждый метод анализируется по ограниченному числу параметров (вейвлеты Добеши, пороговые функции *soft* и *hard*), что в основном объединяет все направления исследований.

Применение метода с адаптивным универсальным порогом для ограничения коэффициентов детализации дискретного вейвлет-разложения (декомпозиции) позволяет упростить алгоритм фильтрации и уменьшить на несколько процентов погрешность. Однако данный эффект проявляется только в случае простых измерительных сигналов (пилообразного, доплеровского, блочного). Поэтому, основной проблемой вейвлет-анализа остаётся разработка алгоритма выбора метода вейвлет-фильтрации с учётом комплексного критерия, включающего характер измерительного сигнала.

При практическом использовании дискретной вейвлет-фильтрации измерительных сигналов разработчик сталкивается с проблемой выбора алгоритма фильтрации по критерию её качества, а затем решает задачу определения параметров выбранного алгоритма. В процессе выбора метода фильтрации (алгоритма обработки сигнала) необходимо определять параметры, обеспечивающие минимальную погрешность. Тогда упрощается задача разработчика средств измерений, поскольку по характеру измерительного сигнала определяется и метод вейвлет-фильтрации, и комплекс оптимальных параметров.

В публикации [2] приведена методика выбора базового вейвлета для уменьшения уровня шума при снятии электрокардиограммы. Влияние шума характеризуется комплексом параметров, в том числе информационной характеристикой сигнала – энтропией [3], и вносимой шумом погрешностью. Поэтому выбор только одного базового вейвлета не решает задачу фильтрации. В работе [4] показано, что фазовая характеристика комплексного вейвлет-спектра, получаемая при непрерывном вейвлет-преобразовании, предпочтительна как при обнаружении слабо выраженных особенностей сигнала, так и для выбора вейвлета. Однако данное решение для оценки эффективности фильтрации приводит к значительным затратам вычислительных ресурсов.

Другое направление исследований, связанное с поиском оптимальных пороговых функций, широко освещено в работах [5–11]. Несмотря на уменьшение погрешности дискретной вейвлет-фильтрации, отсутствие комплексного подхода к выбору метода фильтрации не позволяет существенно улучшить качество фильтрации.

При проведении исследований в области численной оптимизации методов вейвлет-фильтрации важным фактором является выбор системы компьютерной математики. В настоящее время широко используется библиотека свободного доступа SciPy

Python [12, 13]. На базе библиотек SciPy и Jupyter Notebook в работе [14] впервые создан программный модуль оценки характеристик сердечно-сосудистой системы на основе определения характеристик энтропии ЭКГ. Исследования по оптимизации пороговых методов вейвлет-фильтрации с полным набором параметров, влияющих на погрешность, с использованием библиотеки PyWavelets приведены в публикации [15].

Цель статьи – разработка нового алгоритма выбора метода дискретной вейвлет-фильтрации по комплексному критерию, включающему уровень снижения мощности шума, величину уменьшения энтропийной погрешности, функцию измерительного сигнала при общей минимизации среднеквадратичной погрешности. Алгоритм позволит сравнивать методы вейвлет-фильтрации и определять параметры фильтрации в зависимости от характера измерительного сигнала.

Алгоритм выбора метода фильтрации. Выбор метода дискретной вейвлет-фильтрации по комплексному критерию осуществляется по следующему алгоритму:

1. Построение математической модели метода вейвлет-фильтрации с общим порогом для определения базового вейвлета, пороговой функции, величины порога, снижения энтропии сигнала и мощности шума, которые обеспечивают минимальную среднеквадратичную погрешность фильтрации для измерительного сигнала заданного типа.

2. Построение математической модели метода вейвлет-фильтрации без порога для определения вейвлета, уровня вейвлет-разложения (декомпозиции) при котором достигается минимальная среднеквадратичная погрешность для измерительного сигнала данного типа с учётом снижения энтропии сигнала и мощности шума.

3. Построение математической модели метода вейвлет-фильтрации с универсальным порогом для каждого уровня декомпозиции с целью определения вейвлета и пороговой функции, которые обеспечивают минимальную среднеквадратичную погрешность фильтрации шума, снижение уровня шума и энтропии сигнала для измерительного сигнала заданного типа.

4. Выделение групп сигналов с близкими численными значениями снижения шума и энтропии сигнала для измерительных сигналов выбранных типов по каждому методу вейвлет-фильтрации, что позволяет сделать обоснованный выбор метода с учётом комплекса приведенных параметров.

Определение оптимальных параметров вейвлет-фильтрации с общим порогом для всех уровней декомпозиции. Исходный измерительный сигнал $f(t)$ после декомпозиции по всем уровням разложения и реконструкции до исходного определяется по соотношениям [16]:

$$\left. \begin{aligned} a_{j,k} &= \int_R f(t) \varphi_{j,k}(t) dt; \\ d_{j,k} &= \int_R f(t) \psi_{j,k}(t) dt, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где R – интервал определения функции $f(t)$ сигнала; $a_{j,k}$, $d_{j,k}$ – коэффициенты аппроксимации и детализации дискретного вейвлет-разложения сигнала соответственно; $\varphi_{j,k}$, $\psi_{j,k}$ – отцовский и материнский вейвлеты соответственно; j , k – текущий уровень вейвлет-разложения и порядковый номер

вейвлет-коэффициента в вейвлет-разложении сигнала соответственно.

Сигнал описывается как

$$f(t) = \sum_k [a_{j+j_0,k} \varphi_{j+j_0,k}(t)] + \sum_{j=1}^J \sum_k [d_{j+j_0,k} \psi_{j+j_0,k}(t)], \quad (2)$$

где $a_{j+j_0,k}$, $d_{j+j_0,k}$ – коэффициенты аппроксимации и детализации незашумлённого сигнала соответственно; $\varphi_{j+j_0,k}(t)$, $\psi_{j+j_0,k}(t)$ – отцовский и материнский вейвлеты соответственно; j_0 – начальный уровень вейвлет-разложения.

После аддитивного добавления шума к модельной функции или в реальных условиях к измерительному сигналу, зашумлённый сигнал $\bar{f}(t)$ определяется по соотношению [16]:

$$\bar{f}(t) = \sum_k [\bar{a}_{j+j_0,k} \varphi_{j+j_0,k}(t)] + \sum_{j=1}^J \sum_k [\bar{d}_{j+j_0,k} \psi_{j+j_0,k}(t)], \quad (3)$$

где $\bar{a}_{j+j_0,k}$, $\bar{d}_{j+j_0,k}$ – коэффициенты аппроксимации и детализации зашумлённого сигнала соответственно.

Вейвлет, состоящий из двух функций $\varphi_{j+j_0,k}(t)$, $\psi_{j+j_0,k}(t)$, изменяется согласно набору базовых вейвлетов, а пороговая функция $F(\lambda_j)$ – согласно известным базовым функциям. Значение порога λ_j – в пределах 0,01–2,5. При этом отфильтрованный сигнал определяется по соотношению

$$\hat{f}(t) = \sum_k [\bar{a}_{j+j_0,k} \varphi_{j+j_0,k}(t)] + \sum_{j=1}^J \sum_k [F(\lambda_j) \bar{d}_{j+j_0,k} \psi_{j+j_0,k}(t)], \quad (4)$$

где $F(\lambda_j)$ – пороговая функция для коэффициентов детализации $\bar{d}_{j+j_0,k}$, изменившихся под действием шума.

Среднеквадратичная погрешность E фильтрации сигнала длиной N рассчитывается по формуле

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [f(t_i) - \hat{f}(t_i)]^2. \quad (5)$$

Сигнал $f(t_i)$ – информационный, а сигнал $\hat{f}(t_i)$ частично содержит флуктуации, поэтому в каждый момент времени t_i оценивается абсолютная погрешность $e = f(t_i) - \hat{f}(t_i)$, которая далее усредняется. Важно отметить, что E не зависит от взаимосвязи между выборками сигнала.

Используя три вложенных цикла для соотношений (4), (5) по переменным (порогу λ_j и вейвлету $\varphi_{j+j_0,k}(t)$, $\psi_{j+j_0,k}(t)$) и пороговую функцию $F(\lambda_j)$, для минимального значения E получим три новых значения указанных параметров $\hat{\lambda}_j$, $\hat{\varphi}_{j+j_0,k}(t)$, $\hat{\psi}_{j+j_0,k}(t)$, $\hat{F}(\lambda_j)$ и соотношение для отфильтрованного сигнала $\bar{\bar{f}}(t_i)$. Подставим указанные параметры в соотношение (4):

$$\bar{\bar{f}}(t) = \sum_k [\hat{a}_{j+j_0,k} \hat{\varphi}_{j+j_0,k}(t)] + \sum_{j=1}^J \sum_k [\hat{F}(\hat{\lambda}_j) \hat{d}_{j+j_0,k} \hat{\psi}_{j+j_0,k}(t)], \quad (6)$$

где $\bar{\bar{f}}(t)$ – отфильтрованный сигнал первой рекурсии; $\hat{a}_{j+j_0,k}$, $\hat{d}_{j+j_0,k}$ – коэффициенты аппроксимации и детализации, полученные из соотношения (1) для отфильтрованного сигнала $\bar{f}(t_i)$.

Кроме соотношения (5) рассчитывается уменьшение мощности шума $\Delta U = U_2 - U_1$ по уровням до U_1 и после U_2 фильтрации в децибелах

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= 10 \lg \frac{\sum f(t_i)^2}{\sum [f_{\eta}(t_i) - f(t_i)]^2}; \\ U_2 &= 10 \lg \frac{\sum \bar{\bar{f}}(t_i)^2}{\sum [\bar{\bar{f}}(t_i) - f(t_i)]^2}; \\ \Delta U &= 10 \lg \frac{\sum [f_{\eta}(t_i) - f(t_i)]^2}{\sum [\bar{\bar{f}}(t_i) - f(t_i)]^2}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $\sum f(t_i)^2$ – сумма квадратов отсчётов функции $f(t_i)$ чистого сигнала; $\sum f_{\eta}(t_i)^2$ – сумма квадратов отсчётов функции $f_{\eta}(t_i)$ зашумлённого сигнала до фильтрации; $f_{\eta}(t_i) = f(t_i) + \eta$; η – белый нормально распределённый шум; $\sum \bar{\bar{f}}(t_i)^2$ – сумма квадратов отсчётов функции $\bar{\bar{f}}(t)$ сигнала после фильтрации.

Уменьшение энтропийной погрешности $\Delta h = h_1 - h_2$ определяется по разности погрешностей до h_1 и после h_2 фильтрации в дитах:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= 0,5 e^{H_1(d_{1,i})} = 0,5 l_1 n_1 10^{-\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{m_1} n_{1,i} \log(n_{1,i})}; \\ h_2 &= 0,5 e^{H_2(d_{2,i})} = 0,5 l_2 n_2 10^{-\frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{m_2} n_{2,i} \log(n_{2,i})}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $H_1(d_{1,i})$, $H_2(d_{2,i})$ – энтропия распределения зашумлённого $f_{\eta}(t)$ и отфильтрованного $\bar{\bar{f}}(t)$ сигналов соответственно; n_1 , n_2 – объёмы распределений; l_1 , l_2 – ширина столбцов гистограмм; m_1 , m_2 – число столбцов гистограмм.

По методу дискретной фильтрации с общим порогом выявлена только одна функция WernerSorrrows, при фильтрации которой отношение сигнал/шум до и после фильтрации остаётся неизменным, при этом энтропийная погрешность уменьшается (табл. 1).

В таблицах модельные функции обозначены: сигнал «блоки» – blocks; сигнал «удары» – bumps; сигнал «тяжёлый» синус – heavisine; доплеровский сигнал – doppler; «пилообразный» сигнал – ramp; функция сигнала $\sin(0,6902N\pi t)$ – hisine; функция сигнала $\sin(0,3333N\pi t)$ – losine; сигнал с линейной частотной модуляцией – linchirp; сигнал с двойной линейной частотной модуляцией – twochirp; сигнал с квадратичной зависимостью частоты от времени – quadchirp; сумма сигналов linchirp+quadchirp+hisine – mishmash; сигнал Вернера – wernersorrrows; сигнал, содержащий две частоты с гиперболическими функциями от времени – hypchirps; сигнал, содержащий две частоты с линейными функциями от времени – linchirps; сумма четырёх сигналов с линейной гиперболической и квадратичной функциями зависимости частот от времени – chirps; две модулированные функции

Таблица 1

Габо́ра – gabor; синусоидальный сигнал с частотой, обратно пропорциональной времени, – sineoneoverx; обычный импульсный сигнал – piece-regular; кусочно-полиномиальный сигнал – piece-polynomial; недифференцируемая функция Римана – riemann.

По оптимальным параметрам фильтрации наблюдается следующая особенность: для всех функций с уменьшением шума на один децибел порог изменяется в пределах от 0,1 до 0,3, используются только вейвлеты Добеши и пороговая функция soft. Среднеквадратичная погрешность фильтрации сигнала составляет более 0,1. В табл. 1 отмечены (серым и зелёным цветом соответственно) сигналы Вернера и Римана с минимальным и максимальным значениями снижения мощности шума соответственно, и параметрами фильтрации обеспечивающими минимально возможную для данных сигналов энтропийную и среднеквадратичную погрешности.

Уравнение для модельной функции WernerSorrows измерительного сигнала имеет вид [17]:

$$\left. \begin{aligned} f &= \sin(0,5N\pi t^3); \\ f &= f + \sin(0,6902N\pi t); \\ f &= f + \sin(N\pi t^2). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Определение оптимальных параметров вейвлет-фильтрации без порога. Такой метод фильтрации применяется для экономии вычислительных ресурсов в тех случаях, когда погрешности, вносимые шумами, влияют на коэффициенты детализации первых уровней вейвлет-разложения сигнала. Коэффициенты детализации на этих уровнях обнуляются до тех пор, пока среднеквадратичная погрешность не достигает минимума (иногда это происходит уже на первом уровне разложения). Для математического описания вейвлет-фильтрации без порога во втором слагаемом соотношения (4) первое суммирование $\sum_k [\bar{d}_{j+j_0,k} \psi_{j+j_0,k}(t)]$ необходимо начинать с уровня разложения $J = J_{\text{опт}}$; с первого и до уровня $J = J_{\text{опт}}$ все вейвлет-коэффициенты детализации заменяются нулями. В результате последовательного вейвлет-разложения сигнала на уровне разложения $J = J_{\text{опт}}$ достигается минимальная погрешность фильтрации. Дальнейшее разложение до максимально возможного уровня разложения J_{max} , зависящего от вейвлета и длины сигнала, выполняется без изменения коэффициентов детализации $F(\lambda_i) = 1$.

Соотношение для отфильтрованного сигнала $\tilde{f}(t)$ получим из соотношения (4) при условии $\sum_{j=1}^{J_{\text{опт}}} \sum_k [\bar{d}_{j+j_0,k} \psi_{j+j_0,k}(t)] = 0$, результат представим в следующем виде:

$$\tilde{f}(t) = \sum_k [\bar{a}_{j+j_0,k} \varphi_{j+j_0,k}(t)] + \sum_{j=J_{\text{опт}}}^{J_{\text{max}}} \sum_k [\bar{d}_{j+j_0,k} \psi_{j+j_0,k}(t)]. \quad (10)$$

Вводим только одну переменную $\varphi_{j+j_0,k}(t)$, $\psi_{j+j_0,k}(t)$ поскольку в этом методе нет порога и пороговой функции, а соотношение (10) используется для определения уровня

Погрешности и параметры вейвлет-фильтрации с общим порогом

Модельная функция	ΔU , дБ	Δh , дит	Вейвлет	$F(\lambda_i)$	λ_j	$E_{\min}$
blocks	9	1,8199	bior1.3	garotte	1,0	0,0245
bumps	6	0,7019	bior2.6	garotte	0,9	0,0406
heavisine	11	0,6885	rbio5.5	garotte	1,2	0,0136
doppler	13	0,6001	sym14	greater	1,4	0,0088
ramp	18	0,8668	bior1.3	greater	1,3	0,0028
hisine	1	0,2737	sym13	soft	0,2	0,1236
losine	5	0,3791	db32	hard	1,1	0,0576
linchirp	2	0,3728	db21	soft	0,3	0,1136
twochirp	1	0,2667	db8	soft	0,2	0,1436
quadchirp	3	0,3272	db31	garotte	0,6	0,0834
mishmash	1	0,2587	db27	soft	0,2	0,1457
wernersorrows	0	0,1464	db10	soft	0,1	0,1455
hypchirps	7	0,6069	db22	garotte	1,0	0,0367
linchirps	4	0,5695	db15	soft	0,5	0,0759
chirps	1	0,3551	db26	soft	0,3	0,1322
gabor	9	0,7562	bior4.4	hard	1,1	0,0215
sineoneoverx	7	0,4734	sym15	garotte	0,8	0,0323
piece-regular	6	1,5207	bior2.2	garotte	0,9	0,0489
piece-polynomial	7	0,9210	rbio1.3	garotte	1,0	0,0291
riemann	49	0,3518	bior1.1	greater	1,4	0,0000

разложения $J = J_{\text{опт}}$. Для этого полученный по соотношению (10) отфильтрованный сигнал $\tilde{f}(t)$ применяют в цикле, сменяющем вейвлеты для всех уровней разложения J до достижения минимального значения среднеквадратичной погрешности $E_{\min}$. Проведённый цикл позволяет определить вейвлет и уровень вейвлет разложения $J = J_{\text{опт}}$, которые обеспечивают минимальную ошибку $E_{\min}$. Отфильтрованный сигнал $\tilde{f}(t)$ можно использовать для следующего цикла фильтрации в случае применения рекурсии.

Для метода с простым обнулением коэффициентов детализации до момента достижения минимальной среднеквадратичной погрешности количество модельных функций сигнала, для которых уровень шума и энтропийная погрешность до и после фильтрации остаются неизменными, увеличивается до девяти (табл. 2). Для таких сигналов параметры, обеспечивающие минимальную погрешность фильтрации, следующие: вейвлет bior1.1, оптимальный уровень разложения $J_{\text{опт}} = 1$, а максимальный уровень разложения $J_{\text{max}} = 10$.

В табл. 2 выделены три группы сигналов. Первая группа (голубой цвет) включает тяжёлый синус, пилообразный и доплеровский сигналы. Это простые сигналы, шум для этих сигналов уменьшается от 10 до 14 дБ, минимальная среднеквадратичная погрешность фильтрации сигнала находится в пределах 0,01–0,02. Выделяется пилообразный сигнал – как по информационным характеристикам, так и по снижению мощности шума.

Таблица 2

Погрешности и параметры вейвлет-фильтрации без порога

Модельная функция	ΔU , дБ	Δh , дит	Вейвлет	$J_{\text{опт}}$	J_{max}	E_{min}
blocks	3	0,557	bior3.9	3	5	0,0954
bumps	4	0,417	sym14	3	5	0,0645
heavisine	10	0,820	rbio1.3	5	7	0,0172
doppler	10	0,514	db7	6	6	0,0152
ramp	14	0,945	bior1.1	8	10	0,0067
hisine	0	0	bior1.1	1	10	0,1717
losine	3	0,175	coif10	2	4	0,0902
linchirp	0	0	bior1.1	1	10	0,1716
twochirp	0	0	bior1.1	1	10	0,1839
quadchirp	0	0	bior1.1	1	10	0,1686
mishmash	0	0	bior1.1	1	10	0,1718
wernersorrows	0	0	bior1.1	1	10	0,1632
hypchirps	3	0,436	db37	3	3	0,0785
linchirps	3	0,179	coif17	2	3	0,0967
chirps	0	0	bior1.1	1	10	0,1730
gabor	4	0,347	db19	3	3	0,0632
sineoneoverx	3	0,317	db5	3	6	0,0759
piece-regular	0	0	bior1.1	1	10	0,1719
piece-polynomial	0	0	bior1.1	1	10	0,1648
riemann	36	0,847	bior1.1	10	10	0

Вторая группа (серый цвет) сигналов характеризуется нулевым снижением мощности шума. Это сложные сигналы, но нельзя не учитывать высокий уровень аддитивно добавленного шума $\sigma=0,4$. Характерной особенностью этой группы является использование биортогонального вейвлета bior1.1, что следует учесть при работе с шумами меньшей мощности.

Третья группа (зелёный цвет) содержит всего один сигнал, это недифференцируемая функция Римана, которая для всех рассматриваемых методов характеризуется высокой помехоустойчивостью.

Определение оптимальных параметров вейвлет-фильтрации с универсальным порогом. Обработка сигнала по алгоритму с универсальным порогом происходит аналогично алгоритму с общим порогом. Отличие состоит в том, что порог λ_j не задаётся, а вычисляется по следующим соотношениям [16]:

$$\sigma = \text{median}|d_{1,k}|/0,6742; \quad \lambda_j^{\text{univ}} = \sigma \sqrt{2 \ln N_j}, \quad (11)$$

где λ_j^{univ} – универсальный порог; N_j – количество коэффициентов детализации $d_{j,k}$ на j -м уровне разложения; $\text{median}|d_{1,k}|$ – медиана от массива $|d_{1,k}|$ коэффициентов детализации на первом уровне.

Система уравнений (11) используется в соотношении (4), с которым проводят только два вложенных цикла по двум

Таблица 3

Погрешности и параметры вейвлет-фильтрации с универсальным порогом

Модельная функция	ΔU , дБ	Δh , дит	Вейвлет	$F(\lambda_j)$	E_{min}
blocks	8	1,7267	bior1.1	garotte	0,0249
bumps	6	0,5620	bior2.6	garotte	0,0375
heavisine	10	0,6991	rbio4.4	garotte	0,0158
doppler	14	0,5722	sym12	garotte	0,0073
ramp	15	0,6492	rbio1.3	soft	0,0052
hisine	0	0,0000	bior1.1	garotte	0,1694
losine	5	0,4717	sym14	hard	0,0578
linchirp	0	0,0082	sym17	less	0,1797
twochirp	0	0,0000	bior1.1	garotte	0,1863
quadchirp	0	0,5315	bior1.1	garotte	0,1606
mishmash	0	0,0000	bior1.1	garotte	0,1820
wernersorrows	0	0,0000	bior1.1	garotte	0,1722
hypchirps	6	0,5210	db31	hard	0,0398
linchirps	3	0,6446	bior3.7	soft	0,0930
chirps	0	0,0000	db20	less	0,1735
gabor	7	0,8912	db4	garotte	0,0308
sineoneoverx	7	0,4294	rbio5.5	garotte	0,0418
piece-regular	7	2,0241	bior2.4	garotte	0,0389
piece-polynomial	8	0,8583	db2	garotte	0,0277
riemann	18	0,7351	db4	soft	0,0028

переменным вейвлета $\varphi_{j+j_0,k}(t)$, $\psi_{j+j_0,k}(t)$ и пороговой функции $F(\lambda_j)$.

По методу с универсальным порогом количество функций сигнала, для которых мощность шума и энтропийная погрешность до и после фильтрации неизменна, равно пяти. Здесь характерными параметрами является вейвлет bior1.1 и две пороговых функции garotte и less. Среднеквадратичная погрешность фильтрации достигает 0,2 (табл. 3).

В табл. 3 отмечены сигналы с нулевым снижением шума (серый цвет) и сигнал Римана (зелёный цвет), что можно пояснить тем, что метод с универсальным порогом не имеет особых преимуществ перед остальными.

Заключение. Предложенный алгоритм позволил не только выбрать метод, но и определить оптимальные параметры фильтрации. По оптимальным параметрам фильтрации для метода с общим порогом ограничения вейвлет-коэффициентов детализации выявлена следующая особенность: для всех функций с уменьшением шума на один децибел порог изменяется в пределах 0,1–0,3, используются только вейвлеты Добеши и пороговая функция soft. Среднеквадратичная погрешность фильтрации составляет более 0,1. Этот метод применим для фильтрации сигналов с высоким уровнем шума. По методу с универсальным порогом количество функций сигнала, для которых мощность шума и энтропийная погрешность до и после фильтрации неизменны, равно пяти.

Характерными параметрами являются вейвлет bior1.1 и две пороговых функции garotte и less. Среднеквадратичная погрешность фильтрации достигает 0,2. Для метода с простым обнулением коэффициентов детализации до момента достижения минимальной среднеквадратичной погрешности количество модельных функций сигнала, для которых уровень шума и энтропийная погрешность до и после фильтрации остаются низкими, увеличивается до девяти. Параметры, обеспечивающие минимальную погрешность для указанных функций, следующие: вейвлет bior1.1, оптимальный уровень разложения $J_{\text{опт}}$ первый, а максимальный равен десяти. Показано, что сигналы hisine, lincirp, lincirp, twochirp, quadchirp, mishmash, wernersorrows, chirps имеют среднеквадратичную погрешность фильтрации от 0,1 до 0,2, а для остальных сигналов погрешность менее 0,06.

Список источников

1. Беспалов Д. А. Вейвлет-фильтрация сигналов с адаптивными порогами // Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Технические науки. 2007. № 2. С. 13–16.
2. Hong H., Yonghong T., Yuxia W., *Entropy*, 2015, vol. 17, no. 9, pp. 6093–6109. <https://doi.org/10.3390/e17096093>
3. Лосихин Д. А., Олейник О. Ю., Черная Е. С. Автоматизация расчёта энтропийной погрешности измерения // Метрология та прилади. 2018. № 5. С. 50–55. [https://doi.org/10.33955/2307-2180\(5\)2018.50-55](https://doi.org/10.33955/2307-2180(5)2018.50-55)
4. Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Вейвлет-анализ модельных сигналов с особенностями. 2. Аналитическое и дискретное вейвлет-преобразования // Радиофизика и радиоастрономия. 2007. Т. 12. № 3. С. 278–294.
5. Воскобойников Ю. Е. Вейвлет-фильтрация с двухпараметрическими пороговыми функциями: выбор функции и оценивание оптимальных параметров // Автоматика и программная инженерия. 2016. № 1 (15). С. 69–78.
6. Huang Q., Liu B., Zhang W., *Sci. China Technol. Sci.*, 2018, vol. 61, pp. 809–818. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-9098-3>
7. Sheng G., Gao G., Zhang B., *Micromachines*, 2019, vol. 10, no. 9, 608. <https://doi.org/10.3390/mi10090608>
8. Zhang N., Lin P., Xu L., *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 5th International Conference on Mechanical and Aeronautical Engineering (ICMAE 2019), 12–15 December 2019, Sanya, China, IOP Publishing, 2020, vol. 751, no. 1, 012073. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/751/1/012073>
9. Shen Y., *International Society for Optics and Photonics*, 2019, vol. 11179, 1117910. <https://doi.org/10.1117/12.2540098>
10. Gao H.-Y., Bruce A. G., *Statistica Sinica*, 1997, vol. 7, pp. 855–874.
11. Hai Qiu, Jay Lee, Jing Lin, *Journal of sound and vibration*, 2006, vol. 289, no. 4–5, pp. 1066–1090. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.03.007>
12. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T. E., *Nat Methods*, 2020, vol. 17, pp. 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>

13. Дауни А. Б. Цифровая обработка сигналов на языке Python: Пер. с англ. Под ред. А. Э. Бряндинского. ДМК-Пресс, 2017. 162 с.

14. Капкаев Э. Н., Зулкарнеев Р. Х., Насыров Р. В. Программный модуль оценки характеристик сердечнососудистой системы на основе определения характеристик энтропии ЭКГ // VII Всероссийская научная конференция «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений», Уфа, Россия, 28–30 мая 2019. Уфа УГАТУ. 2019. С. 134–138.

15. Тараненко Ю. К. Эффективность использования вейвлет-преобразований при фильтрации шумов в сигналах измерительных преобразователей // Измерительная техника. 2021. № 2. С. 16–21. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-16-21>

16. Воскобойников Ю. Е., Гочаков А. В., Колкер А. Б. Фильтрация сигналов и изображений: Фурье и вейвлет-алгоритмы (с примерами в Mathcad): монография. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2010. 188 с.

17. Donoho D. L., Johnstone I. M., Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage, *Biometrika*, 1994, vol. 81, no. 3, pp. 425–455.

References

1. Bespalov D. A., Wavelet filtration of the signals by adaptive thresholds, *University news, North-Caucasian region, technical sciences series*, 2007, vol. 2, pp. 13–16. (In Russ.)
2. Hong H, Yonghong T., Yuxia W., *Entropy*, 2015, vol. 17, no. 9, pp. 6093–6109. <https://doi.org/10.3390/e17096093>
3. Losikhin D., Oliynyk O., Chorna O., *Metrology and instruments*, 2018, no. 5, pp. 50–55. (In Russ.) [https://doi.org/10.33955/2307-2180\(5\)2018.50-55](https://doi.org/10.33955/2307-2180(5)2018.50-55)
4. Lazorenko O. V., Lazorenko S. V., Chernogor L. F., Wavelet Analysis of the Model Signals with Peculiarities. 2. Analytical and Discrete Wavelet Transforms, *Radio Physics And Radio Astronomy*, 2007, vol. 12, no. 3, pp. 278–294. (In Russ.)
5. Voskoboinikov Yu. E., Veivlet-fil'tratsiya s dvukhparametricheskimi porogovymi funktsiyami: vybor funktsii i otsenivanie optimal'nykh parametrov [Wavelet filtering with two-parameter threshold functions: function selection and estimation of optimal parameters], *Automation and Software Engineering*, 2016, vol. 1 (15), pp. 69–78. (In Russ.)
6. Huang Q., Liu B., Zhang W., *Sci. China Technol. Sci.*, 2018, vol. 61, pp. 809–818. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-9098-3>
7. Sheng G., Gao G., Zhang B., *Micromachines*, 2019, vol. 10, no. 9, 608. <https://doi.org/10.3390/mi10090608>
8. Zhang N., Lin P., Xu L., *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 5th International Conference on Mechanical and Aeronautical Engineering (ICMAE 2019), 12–15 December 2019, Sanya, China, IOP Publishing, 2020, vol. 751, no. 1, 012073. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/751/1/012073>
9. Shen Y., *International Society for Optics and Photonics*, 2019, vol. 11179, 1117910. <https://doi.org/10.1117/12.2540098>
10. Gao H.-Y., Bruce A. G., *Statistica Sinica*, 1997, vol. 7, pp. 855–874.

11. Hai Qiu, Jay Lee, Jing Lin, *Journal of sound and vibration*, 2006, vol. 289, no. 4–5, pp. 1066–1090.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.03.007>
12. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T. E., *Nat Methods*, 2020, vol. 17, pp. 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
13. Allen B. Downey, *Think DSP: Digital Signal Processing in Python*, Green Tea Press, Needham, Massachusetts, 2014, 162 p.
14. Kapkayev E. N., Zulkarneyev R. K., Nasyrov R. V., Programmnyi modul' otsenki kharakteristik serdechnososudistoi sistemy na osnove opredeleniya kharakteristik entropii EKG [Software module for assessing the characteristics of the cardiovascular system based on determining the characteristics of the ECG entropy], VII All-Russian Scientific Conference "Information Technologies of Intellectual Support decision making", Ufa, Russia, May 28–30, 2019, Ufa, USATU Publ., 2019, pp. 134–138.
15. Taranenko Y. K., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, pp. 94–99. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01902-8>
16. Voskoboynikov Y. Y., *Fil'tratsii signalov i izobrazheniy: Fur'ye i veyvlet-algoritmy (s primerami v Mathcad): monografiya [Filtering signals and images: Fourier and wavelet algorithms (with examples in Mathcad): monograph]*, Novosibirsk, NGASU (Sibstrin) Publ., 2010, 188 p.
17. Donoho D. L., Johnstone I. M., Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage, *Biometrika*, 1994, vol. 81, no. 3, pp. 425–455.

Статья поступила в редакцию 06.07.2021; одобрена после рецензирования 30.08.2021; принята к публикации 06.09.2021.
The article was submitted 06.07.2021; approved after reviewing 30.08.2021; accepted for publication 06.09.2021.

Методика измерений поляризационно-запутанных состояний бифотонов с помощью квантового томографа

Дмитрий Николаевич Фроловцев¹, Сергей Александрович Магницкий², Андрей Васильевич Дёмин³✉

^{1, 2} Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, demin@vniiofi.ru✉

¹frolovtsev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1065-9936>

²sergeymagnitskiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8700-2516>

Аннотация. Выполнен статистический анализ погрешностей томографических измерений поляризационно-запутанных состояний бифотонов, которые генерируются источниками на основе эффекта спонтанного параметрического рассеяния света. Детально проанализирован уровень квантовых флуктуаций в схеме совпадений, являющихся неустранимым источником погрешности томографических измерений. С помощью квантового томографа измерена матрица плотности квантового поляризационного состояния бифотонов в поляризационном состоянии Белла. Проведено сравнение инструментальных погрешностей с погрешностями, вызванными квантовыми флуктуациями. Показано, что нет никаких препятствий для создания томографического метрологического стенда, предназначенного для характеристики источников спонтанного параметрического рассеяния света, генерирующих поляризационно-запутанные бифотоны.

Ключевые слова: фотоника, квантовые оптические технологии, квантовая томография, спонтанное параметрическое рассеяние, метрология

Для цитирования: Фроловцев Д. Н., Магницкий С. А., Дёмин А. В. Методика измерения поляризационно-запутанных состояний бифотонов с помощью квантового томографа // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 21–27. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-21-27>

The measurement method of the polarization-entangled states of biphotons using a quantum tomograph

Dmitry N. Frolovtssev¹, Sergey A. Magnitskiy², Andrey V. Demin³✉

^{1, 2} Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ All Russia Research Institute of Optophysical Measurements, Moscow, Russia, demin@vniiofi.ru✉

¹frolovtsev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1065-9936>

²sergeymagnitskiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8700-2516>

Abstract. A statistical analysis of errors in tomographic measurements of polarization-entangled biphoton states generated by sources based on the effect of spontaneous parametric down-conversion is carried out. The level of quantum fluctuations in the coincidence scheme, which is an unavoidable source of error in tomographic measurements, is analyzed in detail. A quantum tomograph was used to measure the density matrix of the quantum polarization state of biphotons in the Bell polarization state. The errors caused by quantum fluctuations are compared with the instrumental errors. It is shown that there are no obstacles to creating a tomographic metrological stand intended for characterizing SPDC-sources generating polarization-entangled biphotons.

Keywords: photonics, quantum optical technologies, quantum tomography, spontaneous parametric down-conversion, metrology

Введение. Источники одиночных фотонов являются одним из базовых элементов современных квантовых оптических технологий. Для таких ключевых направлений квантовой информатики, как квантовые вычисления [1] и квантовая коммуникация [2], важную роль играют источники, которые генерируют коррелированные по времени фотонные пары (бифотоны), находящиеся в так называемом запутанном квантовом состоянии [3]. Квантовые состояния описываются вектором состояния $|\Psi\rangle$, который представляет собой

вектор в гильбертовом пространстве и описывает амплитуды вероятностей нахождения фотонов в соответствующих базисных состояниях. Двухчастичное состояние называется запутанным, если оно не может быть представлено в факторизованном виде, т. е. в виде произведения состояний подсистем $|\Psi_{12}\rangle \neq |\Psi_1\rangle \otimes |\Psi_2\rangle$, где $|\Psi_{12}\rangle$ – вектор состояния бифотона; $|\Psi_1\rangle, |\Psi_2\rangle$ – векторы состояний первого и второго фотонов; символ $\otimes$ означает тензорное произведение. Это означает, что для измерения квантового состояния системы,

находящейся в запутанном квантовом состоянии, недостаточно измерить квантовое состояние всех составляющих её подсистем. Для измерения квантового состояния бифотонов, находящихся в запутанном поляризационном состоянии, недостаточно информации, полученной при измерениях квантового состояния каждого фотона по отдельности (например, с помощью измерения параметров Стокса). Такие состояния могут быть измерены методами квантовой томографии. Свойства запутанных состояний лежат в основе многих протоколов фотонных квантовых технологий [4]. В настоящее время квантовые технологии входят в промышленную стадию развития [5–10]. Для успешной реализации этих технологий необходимо располагать надёжными методиками характеристики квантовых состояний используемого излучения, т. е. оценки (измерения) значений элементов матрицы плотности измеряемого состояния излучения. На квантовые состояния фотонов, как и на состояния практически любой квантовой системы, может оказывать негативное влияние окружающая среда. Поэтому квантовые состояния фотонов необходимо характеризовать не только после их приготовления источником, но и после корректировки искажений, вызванных прохождением через передающий тракт.

Между интенсивным и малофотонным (квантовым) светом существует ряд принципиальных различий [11, 12], касающихся, например, квантовых флуктуаций излучения, а также требований приготовления достаточно большого ансамбля одинаковых «подсистем» для измерения. Поэтому нельзя ограничиваться использованием методик характеристики излучения традиционных источников интенсивного света и необходимо разрабатывать новые методики

характеризации квантовых состояний света, используемого в квантово-оптических устройствах. Свет, в частности, может генерироваться бифотонными источниками, которые основаны на эффекте спонтанного параметрического рассеяния света (СПР). При этом требуются новые подходы, направленные на приборную реализацию квантовых свойств света.

В последние годы методики характеристики состояний фотонов приобретают особое значение в связи с разработкой стандартов, регулирующих новую область квантовых технологий. К настоящему времени Европейским институтом телекоммуникационных стандартов (ETSI) выпущен ряд предварительных, имеющих рекомендательный статус, стандартов, в которых определены методы характеристики основных элементов квантово-оптических систем (см., например, ETSI GS QKD 012 V1.1.1 (2019-02) Quantum Key Distribution (QKD); Device and Communication Channel Parameters for QKD Deployment, ETSI, 2019: [сайт]. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/QKD/001_099/011/01.01.01_60/gs_QKD011v010101p.pdf; ETSI GS QKD 004 V2.1.1 (220-08) Quantum Key Distribution (QKD); Application Interface, ETSI, 2020: [сайт]. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/QKD/001_099/004/02.01.01_60/gs_QKD004v020101p.pdf). Характеризация СПР-источников в указанных документах пока не затрагивается, однако актуальность разработки методов характеристики не вызывает сомнений: СПР-источники играют важную роль в современных квантовых оптических технологиях, обеспечивают генерацию жёстко коррелированных по импульсу и по времени фотонных пар, что является решающим преимуществом перед другими малофотонными источниками, так как позволяет использовать один из фотонов в качестве триггерного.

Цель работы – статистический анализ погрешностей при томографических измерениях поляризационно-запутанных состояний бифотонов, генерируемых СПР-источниками. Особое внимание уделено анализу погрешностей при определении количества коррелированных фотоотсчётов с помощью схемы совпадений, лежащей в основе методики томографических измерений.

Томографические измерения квантовых поляризационных состояний бифотонов. Схема тестируемого СПР-источника и квантового томографа КТ поляризационных состояний бифотонов приведена на рис 1. Источник собран по двухкристальной неколлинеарной схеме, предназначенной для генерации бифотонов в состоянии Бэлла

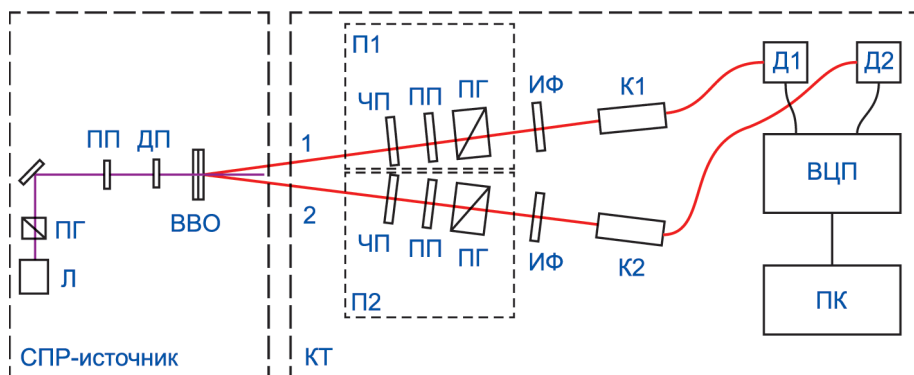


Рис. 1. Схема квантового томографа поляризационных состояний бифотонов: СПР-источник – источник на основе эффекта спонтанного параметрического рассеяния света; КТ – квантовый томограф; Л – лазер; ВВО – двойной нелинейный кристалл ВВО β -BaB₂O₄; П1, П2 – поляризационные проекторы; ПГ – призмы Глана; ИФ – интерференционные светофильтры; К1, К2 – коллиматоры; D1, D2 – детекторы одиночных фотонов; ВЦП – время-цифровой преобразователь idQuantique id800; ПК – персональный компьютер

Fig. 1. Schematic diagram of a quantum tomograph of polarization states of biphotons: SPDC source – the source based on the spontaneous parametric down-conversion; QT – quantum tomograph; L – laser; BBO – double nonlinear crystal BBO β -BaB₂O₄; P1, P2 – polarizing projectors; QWP – quarter-wave plates; HWP – half-wave plates; PG – Glan prisms; IF – interference filters; C1, C2 – collimators; D1, D2 – single photon detectors; TDC – idQuantique time-to-digital converter id800; PC – computer; HWP – half-wave plate; BP – birefringent plate

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|HH\rangle + |VV\rangle),$$

где H обозначает горизонтальную поляризацию, а V – вертикальную [13–15]. Излучение лазера Л на длине волны 405 нм

проходит через призму Глана *ПГ*, полуволновую *ПП* и двулучепреломляющую *ДП* пластинки. Затем излучение накачки падает на двойной нелинейный кристалл β -BaB₂O₄ *ВВО*. В источнике рождаются запутанные по поляризации фотонные пары с центральной длиной волны 810 нм, причём один из фотонов распространяется в пучке 1, а другой – в пучке 2, пучки пространственно разделены. Квантовый томограф [16] имеет два входа, в которые поступает излучение источника, образующее пучки 1, 2, собираемые коллиматорами *К1*, *К2*. Фотоны в каждом пучке последовательно проходят через четвертьволновую *ЧП* и полуволновую *ПП* пластинки, а также призму Глана *ПГ*. Эти три элемента образуют два идентичных поляризационных проектора *П1*, *П2*. Каждый проектор при различных положениях четверть- и полуволновых пластинок пропускает линейную $|H\rangle$, $|V\rangle$, $|D\rangle = (|H\rangle + |V\rangle)/\sqrt{2}$ или циркулярную (правую $|R\rangle = (|H\rangle + i|V\rangle)/\sqrt{2}$ или левую $|L\rangle = (|H\rangle - i|V\rangle)/\sqrt{2}$) поляризацию. Погрешность установки волновых пластинок составляет 1°. Излучение перед сбором коллиматорами проходит через интерференционные светофильтры *ИФ* FBH810-10 (Thorlabs, США). Одиночные фотоны регистрируются детекторами *Д1*, *Д2* [17] российского производства (Лаборатория экспериментальной и теоретической квантовой оптики: [сайт]. URL: <https://labmsu.koddy.ru>) с квантовой эффективностью около 40 %. В детекторах используются фотодиоды SAP-500 (Laser Components, Германия), охлаждённые до температуры –20 °С. Джиттер фотодиодов менее 2 нс. Сигнал детекторов преобразуется с помощью время-цифрового преобразователя *ВЦП* id800 (idQuantique, Швейцария), а затем обрабатывается персональным компьютером *ПК*.

Томограф реализует протокол квантовой томографии, предложенный в [18]. Согласно указанному протоколу необходимо выполнить 16 квантовых измерений (таблица). В соответствии с описанной в [16] процедурой экспериментальные значения элементов матрицы плотности измеряемого состояния излучения источника получают следующим образом:

проекторы *П1*, *П2* устанавливаются так, чтобы они пропустили поляризацию, соответствующую *k*-му томографическому измерению;

в каждом положении проекторов с помощью время-цифрового преобразователя измеряют количество N_k одновременных фотоотсчётов в течение времени измерения *T*;

повторяют указанные выше процедуры для всех 16 томографических измерений.

Линейная реконструкция матрицы плотности квантового поляризационного состояния бифотонов вычисляется по экспериментальным данным согласно выражению [18]:

$$\hat{\rho} = \frac{1}{N_H} \sum_{k=1}^{16} N_k \hat{M}_k, \quad (1)$$

где $N_H = \sum_{k=1}^4 N_k$ – нормировочная постоянная, численно равная количеству одновременных фотоотсчётов с убранными проекторами *П1*, *П2*; $\hat{M}_k$ – матрицы, описывающие вклад каждого N_k в $\hat{\rho}$ при заданном наборе 16 томографических

измерений; явный вид матриц $\hat{M}_k$ получен в [18], в [16] приведены те же матрицы с исправленными опечатками.

Оценочные значения элементов линейной реконструкции матрицы плотности поляризационно-запутанного состояния бифотонов тестируемого СПР-источника в соответствии с формулой (1) рассчитывали численно с помощью специально написанного на языке Python программного обеспечения квантового томографа [16]. Матрица плотности строилась в стандартном лабораторном базисе, в котором значения индексов 1–4 относятся к базисным векторам $|HH\rangle$, $|HV\rangle$, $|VH\rangle$ и $|VV\rangle$ соответственно.

Анализ источников погрешностей измерений. С экспериментальной точки зрения для получения элементов матрицы плотности (1) должно быть измерено лишь количество коррелированных фотоотсчётов N_k . Схема измерения N_k приведена на рис. 2. Методика измерения основана на схеме совпадений. Каждый фотон бифотонной пары после прохождения поляризационного фильтра поступает на счётчик одиночных фотонов *СОФ1* или *СОФ2*, с выхода которых импульсы фотоотсчётов поступают в схему совпадений, где с помощью время-цифрового преобразователя регистрируется время их появления. Результаты сводятся в таблицу (см. рис. 2).

Смысл схемы совпадений заключается в том, что при обработке результатов измерений учитываются только те результаты, при получении которых одновременно сработали оба счётчика, т. е. импульсы фотоотсчётов зарегистрированы в одно и то же время. При этом процедура измерений осуществляется следующим образом. Задаются измерительный интервал *T* (время, в течение которого происходит накопление фотоотсчётов) и временное окно τ , при попадании в которое импульсы фотоотсчётов *СОФ1*, *СОФ2*

Результаты томографических измерений и оценка статистической δ_k и инструментальной ΔN_k погрешностей

<i>k</i>	Состояние поляризации	N_k	δ_k	ΔN_k
1	$ HH\rangle$	2896	50	9
2	$ HV\rangle$	15	4	12
3	$ VV\rangle$	2423	50	13
4	$ VH\rangle$	13	4	11
5	$ RH\rangle$	1475	40	130
6	$ RV\rangle$	1172	34	120
7	$ DV\rangle$	1065	33	90
8	$ DH\rangle$	1260	35	90
9	$ DR\rangle$	534	23	80
10	$ DD\rangle$	2241	50	80
11	$ RD\rangle$	478	22	80
12	$ HD\rangle$	1110	33	90
13	$ VD\rangle$	1327	36	90
14	$ VL\rangle$	1038	32	120
15	$ HL\rangle$	1554	40	130
16	$ RL\rangle$	2357	50	15

считаются совпадающими, т. е. инициированными фотонами одной фотонной пары. Все несовпадающие фотоотсчёты игнорируются. Таким образом, при обработке результатов измерения будут учтены только результаты, зарегистрированные в моменты времени t_1, t_4, t_7 (см. рис. 2).

Такая методика позволяет радикально подавить как оптические, так и темновые шумы, естественным образом возникающие при измерениях на уровне счёта одиночных фотонов, а также устранить влияние одного из самых серьёзных недостатков режима счёта фотонов, связанного с неидеальностью счётчиков (их квантовые эффективности $\eta < 1$, т. е. при попадании коррелированной пары фотонов срабатывает только один счётчик – появляется один импульс фотоотсчёта).

Статистические погрешности. Статистические погрешности, связанные с квантовыми флуктуациями света, становятся значительными при однофотонном режиме. Инструментальные погрешности (например, систематические погрешности, обусловленные нестабильностью мощности лазера накачки и температуры в помещении, погрешности, связанные с темновыми и оптическими шумами в однофотонных детекторах или с неточностью установки поляризационных элементов и т. п.) можно уменьшить до необходимого уровня путём улучшения качества регистрирующей аппаратуры, в отличие от статистических погрешностей, обусловленных квантовыми флуктуациями. Кроме того, источники статистических погрешностей являются нетипичными для сложившейся метрологии классических источников света и, на взгляд авторов настоящей статьи, требуют специального описания.

В рассматриваемой схеме для накачки СПР-источника используется непрерывный лазер. Как следует из физического механизма СПР, времена появления фотонных пар на выходе такого источника будут случайными, а средняя

частота генерации – пропорциональна интенсивности накачки. При этом вероятность p появления фотонных пар (бифотонов) на выходе СПР в единицу времени будет постоянной, не зависящей от времени. Из теории случайных процессов следует, что статистика случайного процесса с вышеперечисленными условиями является пуассоновской, т. е. вероятность P_n появления n бифотонов в течение измерительного интервала T определяется как

$$P_n = e^{-\lambda} \lambda^n / n!,$$

где $\lambda = pT$ – среднее количество фотонов в течение времени T .

При любом k -м томографическом измерении каждый фотон пары проходит через один из проекторов $P1, P2$ и затем регистрируется детекторами одиночных фотонов $D1, D2$ (см. рис. 1). При этом проекторы пропускают фотонные пары в состоянии $|\psi_k\rangle = |\psi_k^1\rangle \otimes |\psi_k^2\rangle$, где $|\psi_k^{1,2}\rangle$ – квантовые состояния поляризации, пропускаемой первым и вторым проекторами соответственно. Таким образом, фотоны оказываются в факторизованном состоянии. При этом вероятность того, что оба фотона пары пройдут через поляризационные проекторы одновременно, равна $p_k = \langle \psi_k | \hat{\rho} | \psi_k \rangle$. Если оба фотона прошли через поляризационные проекторы, то они попадают на детекторы, при этом первый фотон регистрируется с эффективностью η_1 , а второй – с η_2 . В итоге, вероятность одновременной регистрации двух фотоотсчётов $\zeta_k = p_k \eta_1 \eta_2$. Согласно томографической процедуре только эти фотоотсчёты учитываются при вычислении элементов матрицы плотности. Все остальные исходы считаются неуспешными.

Поскольку фотоны после прохождения проекторов не запутаны, то процесс регистрации фотонной пары детекторами можно рассматривать как классическое испытание Бернулли. Успешным считается испытание, в котором будет зарегистрировано по одному фотоэлектрическому импульсу в обоих детекторах с вероятностью ζ_k .

Найдём статистику совпадающих по времени фотоотсчётов при эффективности регистрации фотонной пары $\zeta_k < 1$. Процесс регистрации фотонной пары детекторами можно свести к стандартной классической задаче теории вероятностей [19]: имеется n фотонных пар, независимо падающих на детекторы, при этом с вероятностью ζ_k оба детектора сработают. Требуется найти вероятность того, что после попадания на фотодетектор n бифотонов, будет зарегистрировано m срабатываний обоих детекторов. Такая условная вероятность определяется биномиальным распределением

$$Q(m|n) = C_n^m \zeta_k^m (1 - \zeta_k)^{n-m},$$

где $C_n^m = n! / [(n-m)! m!]$ – биномиальный коэффициент.

Тогда безусловное распределение количества фотоотсчётов Q_m , зарегистрированных за время T будет определяться свёрткой распределения P_n с $Q(m|n)$:

$$Q_m = \sum_{n \geq m} C_n^m \zeta_k^m (1 - \zeta_k)^{n-m} P_n. \quad (2)$$



Рис. 2. Принцип работы схемы совпадений: СОФ1, СОФ2 – счётчики одиночных фотонов; остальные обозначения те же, что на рис. 1

Fig. 2. The principle of operation of the coincidence scheme: SPD1, SPD2 – single photon detectors; the other symbols are the same as in fig. 1

Измерительный интервал T входит в формулу (2) через вероятности P_n .

При ограниченной эффективности регистрации фотонов $\eta < 1$ статистика фотоотсчётов при произвольном P_n не будет повторять статистику фотонов.

Вычислим относительную погрешность $\delta = \sigma / \langle m \rangle$ определения среднего количества фотоотсчётов, обусловленную конечностью выборки. Для этого найдём среднее значение $\langle m \rangle$ количества фотоотсчётов за время T и стандартное отклонение σ распределения фотоотсчётов, заданное формулой (2).

При биномиальном преобразовании распределения P_n факториальные моменты распределений Q_m и P_n связаны следующим образом [19, 20]:

$$\langle m^{(l)} \rangle = \zeta_k^l \langle n^{(l)} \rangle, \quad (3)$$

где $\langle m^{(l)} \rangle = \langle m(m-1) \dots (m-l+1) \rangle$, $\langle n^{(l)} \rangle$ – факториальные моменты l -го порядка распределений Q_m , P_n соответственно.

Согласно формуле (3) справедливы равенства

$$\langle m \rangle = \zeta_k \langle n \rangle; \quad \sigma_m^2 = \zeta_k^2 \sigma_n^2 + \langle n \rangle (\zeta_k - \zeta_k^2).$$

Учитывая, что в рассматриваемой задаче распределение фотонов является пуассоновским, для которого $\langle n \rangle = \lambda$; $\sigma_n^2 = \lambda$, окончательно получим

$$\sigma_m^2 = \zeta_k \lambda. \quad (4)$$

Соотношение (4) позволяет получить в явном виде выражение для относительной погрешности, связанной с квантовыми флуктуациями светового поля. При $\langle m \rangle = \langle m^{(1)} \rangle$, $\langle n \rangle = \lambda$ относительная погрешность определяется выражением

$$\delta = \frac{\sigma_m}{\langle m \rangle} = \frac{\sqrt{\zeta_k \lambda}}{\zeta_k \lambda} = \frac{1}{\sqrt{\zeta_k \lambda}}.$$

С учётом равенств $\lambda = pT$; $\zeta_k = p_k \eta_1 \eta_2$ относительную погрешность количества совпадений запишем как

$$\delta = (p_k \eta_1 \eta_2 p T)^{-1/2}. \quad (5)$$

Таким образом, относительную погрешность количества совпадений, связанную с квантовыми флуктуациями светового поля, можно уменьшить до любого желаемого уровня за счёт увеличения времени T , поскольку все остальные величины в формуле (5) являются константами. В конкретном эксперименте вероятность p появления фотонной пары является константой, зависящей, в частности, от мощности накачки и эффективности нелинейного преобразования фотонов в процессе СПР. Эффективности детектирования η_1 , η_2 также являются константами, зависящими от квантовых выходов фотодиодов, эффективности заведения излучения в детекторы и параметров электронных схем счётчиков, а значение p_k определяется измеряемым квантовым поляризационным состоянием фотонных пар, а также номером томографического измерения.

С учётом равенства $\eta_1 \eta_2 p p_k T = \langle N_k \rangle$ запишем формулу (5) в виде, используемом для обработки экспериментальных данных:

$$\delta_k = N_k^{-1/2},$$

где примерное равенство $\langle N_k \rangle \approx N_k$ выполняется для рассматриваемых измерений, поскольку экспериментально измеренные значения количества совпадений $N_k \gg 1$. Значения N_k , полученные в серии томографических измерений, как и статистические погрешности δ_k , приведены в таблице, откуда минимальная абсолютная статистическая погрешность $\Delta_{rc} = N_k \delta_k = 3,6$.

Инструментальная погрешность. Из всех источников инструментальной погрешности, которые существенно влияют на погрешность томографических измерений в рассматриваемой экспериментальной конфигурации, существенным является неточность установки волновых пластинок. Неточность установки пластинок приводит к тому, что в k -м измерении измеряется проекция на искажённое состояние поляризации, а не на состояние, заданное таблицей. Инструментальная погрешность (стандартное отклонение) $\Delta N_k^{(wp)}$, вызванная неточностью установки волновых пластинок проекторов, определяется выражением [18]:

$$\Delta N_k^{(wp)} = \sqrt{\sum_{s=1}^4 \sum_{\mu, \lambda=1}^{16} f_{k,\mu}^{(s)} f_{k,\lambda}^{(s)} N_\mu N_\lambda};$$

$$f_{v,\mu}^{(s)} = \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta_s} \langle \Psi_v | \right\} \hat{M}_\mu \langle \Psi_v | + \langle \Psi_v | \hat{M}_\mu \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta_s} \langle \Psi_v | \right\},$$

где $|\Psi_v\rangle = |\Psi_v(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)\rangle$ – квантовое состояние, пропускаемое проекторами в v -м измерении, при этом учтена зависимость этого состояния от углов θ_s установки волновых пластинок; четверть- и полуволновые пластинки проекторов обозначены индексом s .

В выполненных экспериментах погрешность установки волновых пластинок составила $\Delta\theta \approx 1^\circ$. Значения инструментальной погрешности томографических измерений сопоставимы со значениями статистической погрешности (см. таблицу). Вклад остальных источников инструментальной погрешности, вызываемой оптическими и темновыми шумами фотодетекторов, несущественен. Действительно, количество случайных совпадений, вызванных шумами, можно оценить сверху как $N_{rc} = R_1 R_2 \tau T$, где $R_{1,2}$ – скорости счёта первого и второго фотодетекторов. В рассматриваемом случае $R_1 \approx R_2 \approx 1,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$; $\tau = 8 \text{ нс}$; $T = 30 \text{ с}$, откуда $\langle N_{rc} \rangle \approx 0,54$, что намного меньше как статистической погрешности, так и погрешности, связанной с неточностью установки пластинок. Джиттеры детекторов одиночных фотонов и время-цифрового преобразователя не влияют на точность измерений, так как попадание либо непопадание импульсов фотоотсчётов во временное окно определяет лишь то, будет или не будет учтено данное измерение в процессе постселекции. Это влияет лишь на объём выборки, а не на точность измерений. В описываемой установке

джиттер фотодиодов не превышает 2 нс (FWHM), точность измерения используемым время-цифровым преобразователем составляет 81 пс. Ширина временного окна $\tau=8$ нс выбрана из тех соображений, что при данных параметрах используемой аппаратуры в результате постселекции будет отобрано не менее 90 % зарегистрированных парных фотоотсчётов.

Результаты томографических измерений квантовых поляризационных состояний бифотонов, генерируемых СПР-источником. Результаты томографических измерений поляризационно-запутанного состояния Бэлла, генерируемого тестируемым СПР-источником, приведены в таблице, где использованы стандартные квантово-механические обозначения, например запись $|RH\rangle$ означает, что проекторы $P1$, $P2$ (см. рис. 1) пропускают правую и горизонтальную поляризацию соответственно.

На основе полученных экспериментальных данных по формуле (1) рассчитана линейная реконструкция матрицы плотности

$$\hat{\rho}_{\text{exp}} = \begin{pmatrix} 0,542 & -0,065-0,018i & -0,036+0,004i & 0,425-0,261i \\ -0,065+0,018i & 0,003 & 0,023-0,011i & -0,029+0,009i \\ -0,036-0,004i & 0,023+0,011i & 0,002 & 0,020+0,034i \\ 0,425+0,261i & -0,029-0,009i & 0,020-0,034i & 0,453 \end{pmatrix}.$$

Согласно анализу погрешностей параметры экспериментальных измерений подобраны таким образом, что существенными являются только два вида погрешности: статистическая погрешность, вызванная квантовыми флуктуациями и погрешность при установке угла волновых пластинок. Поэтому для расчёта погрешности элементов матрицы можно использовать алгоритм обработки томографических измерений, приведенный в работе [18], который учитывает именно эти два вида погрешности. Входными данными алгоритма являются экспериментальные значения N_k 16 томографических измерений и погрешность Δ_θ установки угла θ_s . Для приведённых экспериментальных данных погрешности в значениях элементов матрицы плотности, численно рассчитанные по вышеуказанному алгоритму, оказались равными

$$\delta\hat{\rho} = \begin{pmatrix} 0,010 & 0,019+0,027i & 0,019+0,026i & 0,037+0,037i \\ 0,019+0,027i & 0,002 & 0,036+0,038i & 0,018+0,023i \\ 0,019+0,026i & 0,036+0,038i & 0,002 & 0,019+0,024i \\ 0,037+0,037i & 0,018+0,023i & 0,019+0,024i & 0,0095 \end{pmatrix},$$

где действительная (мнимая) часть некоторого элемента матрицы $\delta\hat{\rho}$ означает погрешность действительной (мнимой) части соответствующего элемента матрицы плотности (например, $\text{Re } \rho_{41}=0,425\pm0,037$; $\text{Im } \rho_{41}=0,261\pm0,037$).

Сравним экспериментально полученную матрицу плотности состояния, генерируемого тестируемым источником с матрицей плотности $\hat{\rho}_0$ эталонного состояния $|\Phi^+\rangle$, которое теоретически должен генерировать идеальный источник. Для состояния $|\Phi^+\rangle$ матрица $\hat{\rho}_0=|\Phi^+\rangle\langle\Phi^+|$ имеет вид

$$\hat{\rho}_0 = \begin{pmatrix} 0,5 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,5 & 0 & 0 & 0,5 \end{pmatrix}.$$

Визуальное сравнение матриц $\hat{\rho}_{\text{exp}}$ и $\hat{\rho}_0$ показывает, что измеряемое состояние слабо отличается от эталонного, так как угловые элементы матрицы $\hat{\rho}_{\text{exp}}$ близки к 0,5, а остальные элементы – к нулю. Относительно большая мнимая часть элементов ρ_{14} , ρ_{41} объясняется тем, что фаза этих комплексных чисел является фазой между векторами $|HH\rangle$ и $|VV\rangle$, которая определяется эллиптичностью поляризации накачки, т. е. источник отъюстирован неточно.

Для практических целей, в частности, для создания томографического метрологического стенда, визуального сравнения состояний недостаточно. Нужен количественный критерий, например критерий степени совпадения (fidelity) [21], с помощью которого количественно определяется степень совпадения измеренного квантового состояния $\hat{\rho}_{\text{exp}}$ и эталонного состояния (в рассмотренных экспериментах $|\Phi^+\rangle$). Для этого вводится численный параметр $F=[0, 1]$ (степень совпадения), вычисляемый по формуле

$$F = \langle \Phi^+ | \hat{\rho}_{\text{exp}} | \Phi^+ \rangle. \quad (6)$$

Здесь в матричном представлении $|\Phi^+\rangle = 2^{-1/2}(1 \ 0 \ 0 \ 1)^T$; $\langle\Phi^+| = 2^{-1/2}(1 \ 0 \ 0 \ 1)$. В случае $F=1$ сравниваемые состояния тождественны, в случае $F=0$ – ортогональны. Для тестируемого источника согласно выражению (6) $F=0,92\pm0,04$.

Заключение. Результаты детального анализа погрешностей томографических измерений при тестировании СПР-источников поляризационно-запутанных бифотонов показывают, что нет никаких препятствий для создания томографического метрологического стенда, предназначенного для характеристики СПР-источников, генерирующих поляризационно-запутанные бифотоны. Описанная в работе методика позволяет полностью автоматизировать данный стенд, который будет не только измерять квантовое состояние, но и вычислять погрешности всех измеряемых величин. Если к методике квантовой томографии состояний добавить критерий степени совпадения, то с использованием томографического метрологического стенда можно получить обобщённую количественную оценку близости реального, генерируемого СПР-источником, состояния к эталонному.

Благодарности. Авторы выражают благодарность П. П. Гостеву за помощь в анализе факториальных моментов и профессору А. С. Чиркину за полезные обсуждения по вопросам статистической оптики.

Список источников

1. Kok P. et al., *Reviews of Modern Physics*, 2007, vol. 79, no. 1, p. 135. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.79.135>
2. Gisin N., Thew R., *Nature Photonics*, 2007, vol. 1, no. 3, p. 165. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.22>

References

3. Kwiat P. G., Mattle K., Weinfurter H., Zeilinger A. et al., *Physical Review Letters*, 2005, vol. 75, p. 4337. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.4337>
4. O'Brien J. L., Furusawa A., Vučković E., *Nature Photonics*, 2009, vol. 3, no. 12, p. 687. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2009.229>
5. Магницкий С. А., Фроловцев Д. Н., Агапов Д. П. и др. Метрология одиночных фотонов для квантовых информационных технологий // Измерительная техника. 2017. № 3. С. 24–29. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2017-3-24-29>
6. Sussman B. et al., *Quantum Science and Technology*, 2019, vol. 4, no. 2, 020503. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ab029d>
7. Riedel M. et al., *Quantum Science and Technology*, 2019, vol. 4, no. 2, 020501. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ab042d>
8. Monroe C., Raymer M. G., Taylor J., *Science*, 2019, vol. 364, no. 6439, pp. 440–442. <https://doi.org/10.1126/science.aax0578>
9. Yamamoto Y., Sasaki M., Takesue H., *Quantum Science and Technology*, 2019, vol. 4, no. 2, 020502. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ab0077>
10. Raymer M. G., Monroe C., *Quantum Science and Technology*, 2019, vol. 4, no. 2, 020504. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ab0441>
11. Клышко Д. Н. Фотоны и нелинейная оптика. М.: Наука, 1980. 254 с.
12. Клышко Д. Н. Когерентный распад фотонов в нелинейной среде // Письма в ЖЭТФ. 1967. Т. 6. № 1. С. 490–492.
13. Kwiat P. G., et al., *Physical Review A*, 1999, vol. 60, no. 2, R773. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.60.R773>
14. Magnitskiy S., Frolovtssev D., Firsov V. et al., *Journal of Russian Laser Research*, 2015, vol. 36, no. 6, pp. 618–629. <https://doi.org/10.1007/s10946-015-9540-x>
15. Frolovtssev D. N., Magnitskiy S. A., *Physics of Wave Phenomena*, 2017, vol. 25, no. 3, pp. 180–184. <https://doi.org/10.3103/S1541308X17030049>
16. Фроловцев Д. Н., Магницкий С. А., Дёмин А. В. Квантовый томограф для измерения и характеристики бифотонных источников // Измерительная техника. 2020. № 4. С. 20–26. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-4-20-26>
17. Гостев П. П., Агапов Д. П., Дёмин А. В. и др. Измерение квантовой эффективности счётчиков фотонов на базе лавинных фотодиодов методом спонтанного параметрического рассеяния с асимметричными по спектру каналами // Измерительная техника. 2018. № 12. С. 27–32. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-12-27-32>
18. James D. F. V et al., *Physical Review A*, 2001, vol. 64, no. 5, 052312. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.64.052312>
19. Гостев П. П., Магницкий С. А., Чиркин А. С. Обратная задача статистики фотоотсчётов. М.: Физический факультет МГУ, 2020.
20. Abate J. A., Kimble H. J., Mandel L., *Physical Review A*, 1976, vol. 14, no. 2, p. 788. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.14.788>
21. Jozsa R., *Journal of Modern Optics*, 1994, vol. 41, no. 12, pp. 2315–2323. <https://doi.org/10.1080/09500349414552171>
1. Kok P. et al., *Reviews of Modern Physics*, 2007, vol. 79, no. 1, p. 135. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.79.135>
2. Gisin N., Thew R., *Nature Photonics*, 2007, vol. 1, no. 3, p. 165. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.22>
3. Kwiat P. G., Mattle K., Weinfurter H., Zeilinger A. et al., *Physical Review Letters*, 2005, vol. 75, p. 4337. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.4337>
4. O'Brien J. L., Furusawa A., Vučković E., *Nature Photonics*, 2009, vol. 3, no. 12, p. 687. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2009.229>
5. Magnitskii S. A., Frolovtssev D. N., Agapov D. P. et al., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 3, pp. 235–241. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1179-2>
6. Sussman B. et al., *Quantum Science and Technology*, 2019, vol. 4, no. 2, 020503. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ab029d>
7. Riedel M. et al., *Quantum Science and Technology*, 2019, vol. 4, no. 2, 020501. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ab042d>
8. Monroe C., Raymer M. G., Taylor J., *Science*, 2019, vol. 364, no. 6439, pp. 440–442. <https://doi.org/10.1126/science.aax0578>
9. Yamamoto Y., Sasaki M., Takesue H., *Quantum Science and Technology*, 2019, vol. 4, no. 2, 020502. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ab0077>
10. Raymer M. G., Monroe C., *Quantum Science and Technology*, 2019, vol. 4, no. 2, 020504. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ab0441>
11. Klyshko D. N., *Photons nonlinear optics*, CRC Press, 1988, 438 p.
12. Klyshko D. N., Coherent photon decay in a nonlinear medium, *JETP Letters*, 1967, vol. 6, iss. 1, pp. 23–25.
13. Kwiat P. G., et al., *Physical Review A*, 1999, vol. 60, no. 2, R773. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.60.R773>
14. Magnitskiy S., Frolovtssev D., Firsov V. et al., *Journal of Russian Laser Research*, 2015, vol. 36, no. 6, pp. 618–629. <https://doi.org/10.1007/s10946-015-9540-x>
15. Frolovtssev D. N., Magnitskiy S. A., *Physics of Wave Phenomena*, 2017, vol. 25, no. 3, pp. 180–184. <https://doi.org/10.3103/S1541308X17030049>
16. Frolovtssev D. N., Magnitskiy S. A., Demin A. V., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 4, pp. 273–280. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01783-3>
17. Gostev P. P., Agapov D. P., Demin A. V. et al., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 61, no. 12, pp. 1166–1173. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01565-6>
18. James D. F. V et al., *Physical Review A*, 2001, vol. 64, no. 5, 052312. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.64.052312>
19. Gostev P. P., Magnitskiy S. A., Chirkin A. S., *The inverse problem of photocount statistics*, Moscow, MGU Publ., 2020. (In Russ.)
20. Abate J. A., Kimble H. J., Mandel L., *Physical Review A*, 1976, vol. 14, no. 2, p. 788. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.14.788>
21. Jozsa R., *Journal of Modern Optics*, 1994, vol. 41, no. 12, pp. 2315–2323. <https://doi.org/10.1080/09500349414552171>

Статья поступила в редакцию 06.04.2021; одобрена после рецензирования 14.07.2021; принята к публикации 21.07.2021.
The article was submitted 06.04.2021; approved after reviewing 14.07.2021; accepted for publication 21.07.2021.

Бюджет неопределённости рубидиевого репера частоты фонтанного типа: результаты предварительных исследований

Дмитрий Сергеевич Купалов^{1✉}, Вячеслав Николаевич Барышев², Игорь Юрьевич Блинов³, Александр Иванович Бойко⁴, Юрий Сергеевич Домнин⁵, Екатерина Викторовна Иванченко⁶

^{1, 2, 4, 5, 6} Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл., Россия, ¹kupalov@vniiftri.ru, ²baryshev@vniiftri.ru, ⁴boiko@vniiftri.ru, ⁵ydomnin@vniiftri.ru, ⁶ivanchenkocathrine@gmail.com

³ Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей», Москва, Россия, navigator32@rambler.ru

Аннотация. Описаны состав, принцип работы и основные метрологические характеристики рубидиевого репера частоты фонтанного типа, разработанного во ВНИИФТРИ. По результатам предварительных исследований составлен бюджет неопределённости рубидиевого репера частоты фонтанного типа. Рассмотрены физические эффекты, вызывающие наибольшие сдвиги измеряемой частоты, такие как квадратичный эффект Зеемана, излучение чёрного тела, гравитационный эффект, затягивание резонатора. Показано, что разработанный рубидиевый репер частоты имеет нестабильность $\sigma_y(\tau) = 1,43 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$, неисключённая систематическая погрешность воспроизведения частоты составляет менее $2 \cdot 10^{-16}$. Представленные характеристики находятся на уровне лучших стандартов частоты фонтанного типа, разработанных к настоящему времени в различных метрологических институтах мира. Полученные результаты актуальны для сферы метрологического обеспечения в области измерений времени, частоты и формирования шкал времени.

Ключевые слова: лазерное охлаждение, репер частоты фонтанного типа, атом рубидия

Для цитирования: Купалов Д. С., Барышев В. Н., Блинов И. Ю., Бойко А. И., Домнин Ю. С., Иванченко Е. В. Бюджет неопределённости рубидиевого репера частоты фонтанного типа: результаты предварительных исследований // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 28–33. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-28-33>

The uncertainty budget of the rubidium fountain: the preliminary results

Dmitry S. Kupalov^{1✉}, Viacheslav N. Baryshev², Igor Yu. Blinov³, Alexander I. Boiko⁴, Yuri S. Domnin⁵, Ekaterina V. Ivanchenko⁶

^{1, 2, 4, 5, 6} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region, Russia, ¹kupalov@vniiftri.ru, ²baryshev@vniiftri.ru, ⁴boiko@vniiftri.ru, ⁵ydomnin@vniiftri.ru, ⁶ivanchenkocathrine@gmail.com

³ “Almaz-Antey” Air and Space Defence Corporation, Moscow, Russia, navigator32@rambler.ru

Abstract. The structure, principle of operation and metrological performance of rubidium fountain developed at VNIIFTRI are presented. The preliminary uncertainty budget of this standard is the main goal of this research. The physical effects that cause the largest shifts of the measured frequency: quadratic Zeeman effect, blackbody radiation effect, gravitational redshift, cavity pulling effect are considered. Its frequency stability is $\sigma_y(\tau) = 1.43 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$ and evaluated frequency uncertainty is less than $2 \cdot 10^{-16}$. Those performances are at the level of the best rubidium fountain standards developed across the world. Those results are relevant for the time and frequency metrology and for timescales.

Keywords: laser cooling, frequency standard, atomic fountain, rubidium atom

Введение. Обеспечение независимого воспроизведения, хранения и передачи единиц времени и частоты для формирования национальной шкалы времени является одним из основных направлений деятельности Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) ВНИИФТРИ. Для обеспечения потребностей государства в эталонных сигналах частоты и времени с заданными характеристиками в ГСВЧ непрерывно ведутся работы по модернизации эталонной базы.

С 2012 г. в ГСВЧ разрабатываются стандарты частоты фонтанного типа на основе холодных атомов рубидия. В рубидиевых стандартах частоты фонтанного типа, в отличие от цезиевых, неисключённая систематическая погрешность (НСП) воспроизведения частоты меньше из-за меньшего по значению спин-обменного сдвига. Этот эффект вносит наибольший вклад в бюджет неопределённости систематических сдвигов частоты [1]. Данный факт свидетельствует о том, что рубидиевые реперы частоты фонтанного типа теоретически точнее цезиевых.

Согласно резолюциям Международного консультативного комитета по времени и частоте Международного бюро мер и весов от 2006 г. и 2012 г., атом рубидия входит в список перспективных атомарных сред для переопределения единицы времени – секунды – в Международной системе единиц [2].

В настоящее время в состав Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018 входят четыре рубидиевых фонтана со средним квадратическим относительным двухвыборочным отклонением (СКДО) меньше $2 \cdot 10^{-16}$ в интервале времени измерения 16 сут [3, 4]. Основной функцией этих приборов является хранение единиц времени и частоты, а основной метрологической характеристикой – СКДО. Требования к непрерывному режиму работы хранителей и максимальному количеству рабочих атомов затрудняют процесс исследования систематических сдвигов частоты. Для уменьшения НСП и изучения физических эффектов, вызывающих сдвиг измеряемой частоты, во ВНИИФТРИ ведутся работы по созданию рубидиевого репера частоты фонтанного типа.

Цель данной статьи – описать конструкцию и принцип работы рубидиевого репера частоты фонтанного типа, исследовать физические эффекты, вызывающие наибольшие сдвиги частоты, и составить бюджет неопределённости по результатам предварительных исследований.

Метод воспроизведения частоты невозмущённого атомного перехода. Стандарт частоты фонтанного типа включает в себя четыре основные части: спектроскоп, лазерно-оптическую систему, систему формирования зондирующего сигнала и систему управления. Воспроизведение частоты невозмущённого атомного перехода ^{87}Rb осуществляется циклически.

В начале цикла поток медленных атомов ^{87}Rb , сформированный во вспомогательной магнитооптической ловушке спектроскопа (рис. 1), направляется в центр основной ловушки, где формируется облако медленных атомов. Затем облако охлаждается до температур порядка единиц микрокельвинов и подбрасывается вертикально вверх. Формирование облака, его охлаждение и подброс происходят с помощью лазерного излучения. В результате все атомы распределяются по пяти энергетическим подуровням $F=2$, $m_F=-2, \dots, +2$, где F – полный угловой момент атома в основном состоянии, m_F – магнитное квантовое число.

Во время полёта вверх облако проходит через вспомогательный (селектирующий) резонатор, настроенный на частоту атомного перехода между подуровнями ($F=2$, $m_F=0$) и ($F=1$, $m_F=0$). Атомы, не совершившие этот переход, отклоняются от вертикальной траектории лазерным излучением, резонансным оптическому переходу $F=2 \leftrightarrow F'=3$, где F' – полный угловой момент атома в возбуждённом состоянии. Затем облако атомов в состоянии ($F=1$, $m_F=0$) влетает в основной сверхвысокочастотный (СВЧ) резонатор, на который подаётся зондирующий сигнал, и часть атомов переводится в состояние ($F=2$, $m_F=0$). Достигнув наивысшей точки траектории, облако под действием гравитации начинает падать вниз, и атомы ещё раз взаимодействуют с полем резонатора. После этого в детекторной секции происходит регистрация состояний ($F=1$, $m_F=0$) и ($F=2$, $m_F=0$) Таким образом, с

помощью расчётного отношения числа атомов в состояниях ($F=1$, $m_F=0$) и ($F=2$, $m_F=0$) частота зондирующего СВЧ-сигнала сравнивается с частотой часового перехода.

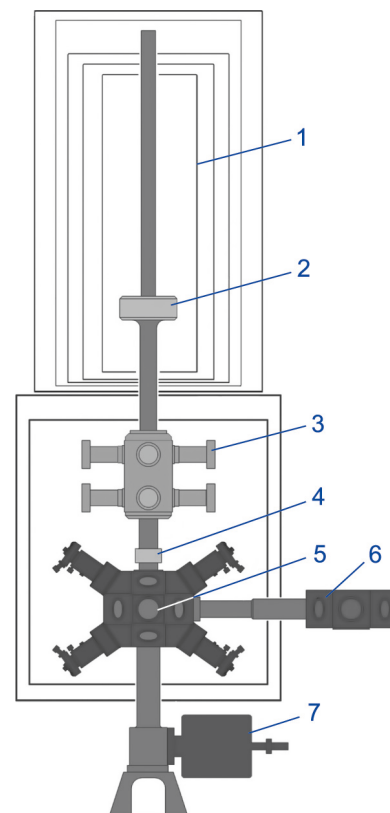
В момент достижения облаком апогея фаза зондирующего сигнала изменяется на $\pm 90^\circ$ для стабилизации частоты кварцевого генератора относительно атомного перехода. Рассчитанный системой управления разностный сигнал измерений используется в качестве сигнала ошибки для петли обратной связи СВЧ-синтезатора. Подстройка выходной частоты синтезатора системы формирования зондирующего сигнала происходит по окончании 100 рабочих циклов рубидиевого репера частоты фонтанного типа.

Результаты. Конструкция атомного спектроскопа состоит из вспомогательной ловушки – источника медленных атомов ^{87}Rb , узла вакуумной откачки, основной ловушки, блока детектирования, селектирующего резонатора, основного резонатора с пролётным пространством, магнитных экранов и катушек подмагничивания (см. рис. 1). Вакуумная система спектроскопа изготовлена из титана (за исключением СВЧ-резонатора). Магниторазрядный насос, расположенный в нижней части спектроскопа, обеспечивает сверхвысокий вакуум порядка $3 \cdot 10^{-8}$ Па.

Корпус основной ловушки представляет собой куб, диагональ которого совпадает с вертикальной осью спектроскопа. На гранях куба располагаются просветлённые оптические вакуумные окна для ввода лазерного излучения, формирующего атомное облако. Дополнительные окна ловушки необходимы для визуального контроля облака и ввода перекачивающего лазерного излучения.

Рис. 1. Упрощённое изображение спектроскопа:
1 – магнитные экраны; 2 – основной резонатор с пролётным пространством; 3 – блок детектирования; 4 – селектирующий резонатор; 5 – основная ловушка; 6 – вспомогательная ловушка; 7 – узел вакуумной откачки

Fig. 1. Spectroscope of a rubidium fountain drawing:
1 – magnetic shields, 2 – microwave cavity and flight tube, 3 – detection section, 4 – selection cavity, 5 – main trap, 6 – secondary trap, 7 – vacuum pumping section



Над ловушкой расположен селектирующий резонатор, выполненный в виде титанового цилиндра и соосно закреплённый в нём кварцевой втулкой диаметром около 15 мм. Кварцевая втулка позволяет уменьшить геометрические размеры полости резонатора и разместить резонатор непосредственно в блоке детектирования. Геометрические размеры резонатора подобраны таким образом, чтобы СВЧ-мода типа H_{011} имела частоту близкую к частоте $f_0 = 6,8346826109$ ГГц [2], где f_0 – рекомендованное значение частоты часового перехода ^{87}Rb [2].

Нагруженная добротность резонатора $Q \sim 800$. СВЧ-поле, резонансное атомному переходу $(F=2, m_F=0) \rightarrow (F=1, m_F=0)$, включается в тот момент, когда облако пролетает через селектирующий резонатор и вызывает π -переход между двумя сверхтонкими состояниями. Вырождение между переходами с различными магнитными моментами снимается дополнительным статическим магнитным полем, создаваемым магнитными катушками в зоне селектирующего резонатора. Таким образом, СВЧ-поле резонатора не влияет на населённость других магнитных подуровней $(F=2, m_F=-2, -1, 1, 2)$, которые при пролёте облака через блок детектирования отклоняются от вертикальной траектории лазерным излучением. После пролёта через селектирующий резонатор оставшиеся атомы находятся в состоянии $(F=1, m_F=0)$, которое наименее чувствительно к флуктуациям внешнего магнитного поля.

Пролётное пространство и основной СВЧ-резонатор окружены катушкой С-поля, необходимой для снятия вырождения квантовых состояний сверхтонкой структуры. Для подавления влияния внешних магнитных полей применяется пятислойный магнитный экран из пермаллоя с коэффициентом экранирования около $2,5 \cdot 10^5$.

На высоте 0,48 м от центра ловушки расположен основной СВЧ-резонатор. Мода СВЧ-колебаний H_{011} на частоте часового перехода ^{87}Rb возбуждается в резонаторе через круглые отверстия с помощью двух симметричных прямоугольных волноводов. Нагруженная добротность резонатора $Q \sim 28600$.

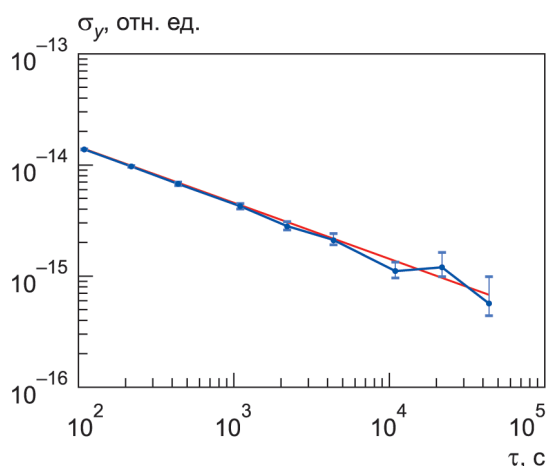


Рис. 2. Среднеквадратическое относительное двухвыборочное отклонение σ_y (СКДО, девиация Аллана) рубидиевого репера частоты фонтанного типа относительно водородного генератора

Fig. 2. Stability (Allan deviation) of rubidium fountain versus H-maser

Лазерно-оптическая система репера частоты фонтанного типа построена на основе двух лазеров. Первый диодный лазер Toptica TA Pro выходной мощностью 1 Вт генерирует излучение для охлаждения и детектирования квантовых состояний атомов. Стабилизация частоты лазерного излучения происходит по оптическому циклическому переходу $F=2 \leftrightarrow F'=3$ атома ^{87}Rb с помощью частотно-модуляционной спектроскопии, а именно метода спектроскопии с переносом модуляции. Излучение лазера Toptica TA Pro используется для формирования интенсивного потока атомов из вспомогательной ловушки в основную ловушку, а также для охлаждения атомов в основной ловушке и детектирования. Управление частотой и мощностью лазерного излучения происходит с помощью акустооптических модуляторов в конфигурации двойного прохода.

Чтобы предотвратить уход атомов из процесса охлаждения в оптической ловушке, а также продетектировать квантовое состояние $(F=1, m_F=0)$, необходимо лазерное излучение, которое перекачивает атомы со сверхтонкого подуровня $F=1$ на подуровень $F=2$ основного состояния. Для этого используется второй диодный лазер Toptica DL100 Pro Design, частота которого стабилизируется по перекрёстному оптическому переходу $F=1 \rightarrow F'=1, 2$ с помощью частотно-модуляционной спектроскопии. Смещение стабилизированной частоты на переход $F=1 \rightarrow F'=2$ перекачивающего лазера осуществляется также акустооптическими модуляторами. Излучение из лазерно-оптической системы распространяется по одномодовым оптоволоконкам, сохраняющим поляризацию, к коллиматорам, жёстко зафиксированным на корпусе ловушки спектрографа и формирующим шестилучевую оптическую ловушку в конфигурации (1, 1, 1).

В основе системы формирования зондирующего сигнала лежит коммерческий синтезатор RB-1 (SpectraDynamics, Inc), стабилизированный по внешнему сигналу от водородного генератора (ЗАО «Время-Ч»).

Система управления репера, построенная на базе шасси PXIe-1085 от National Instruments, обеспечивает управление акустооптическими модуляторами, приём и оцифровку сигналов фотодетекторов, управление синтезатором, а также обработку полученных результатов.

Анализ результатов и оценка систематических сдвигов частоты по результатам предварительных исследований. Для оценки эффективности лазерного охлаждения атомов рубидия температура облака вычисляется по следующей формуле (она составила менее 3 мК):

$$T_{\text{эфф}} = g^2 M_{\text{Rb}} v_d (t_1^2 - t_2^2) / (16 K v_3), \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; M_{Rb} – масса атома рубидия; v_d, v_3 – скорости соответственно атомного облака на уровне детектора при полёте вверх и запуске атомного облака; K – постоянная Больцмана; t_1, t_2 – ширины сигнала фотодетектора от атомного облака соответственно при полёте вверх и вниз по уровню полувысоты.

На рис. 2 приведён график СКДО (девиация Аллана) относительно водородного генератора. Измеренные значения

укладываются в модель белого частотного шума и аппроксимируются выражением

$$\sigma_y(\tau) = 1,43 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}.$$

Эффективность применения атомных стандартов частоты зависит прежде всего от степени воздействия физических эффектов на частоту невозмущённого часового атомного перехода, а также от неопределённости оценки этого воздействия. Далее рассмотрены основные эффекты, вызывающие сдвиг измеряемой частоты в репере частоты фонтанного типа.

Эффект Зеемана второго порядка. Для снятия вырождения по квантовому числу m_F в сверхтонкой структуре основного состояния атомов рубидия необходимо постоянное магнитное поле. В атомном фонтане это обеспечивается соленоидом С-поля, который окружает основной резонатор и пролётное пространство, а также компенсационными магнитными катушками.

Относительный сдвиг частоты атомного перехода в постоянном магнитном поле (эффект Зеемана) вычисляется по формуле Брэйт-Раби [5]. Для часового перехода атома рубидия ($F=1, m_F=0 \rightarrow F=2, m_F=0$) относительный сдвиг частоты из-за рассматриваемого эффекта определяется как

$$\frac{\Delta f_{Z2}}{f_0} = \frac{(g_J - g_I)^2 \mu_B^2}{2h^2 f_0^2} B^2,$$

где $g_J = 2,00233113$, $g_I = -0,0009951414$ – g -факторы соответственно электрона и ядра для ^{87}Rb [6]; μ_B – магнетон Бора; h – постоянная Планка; B – магнитная индукция.

Магнитная индукция определяется через смещение частоты центрального пика резонанса Рэмси магниточувствительного атомного перехода ($F=1, m_F=1 \rightarrow F=2, m_F=1$). Зависимость вероятности этого перехода от отстройки по частоте зондирующего сигнала изображена на рис. 3. Линейный сдвиг частоты вследствие эффекта Зеемана определяется как

$$\Delta f_{Z1} = B \mu_B (g_J - g_I) / (2h),$$

При рабочей высоте подброса атомного облака 0,8 м относительный сдвиг частоты составляет

$$\Delta f_{Z2}/f_0 = 121,88 \cdot 10^{-15}.$$

Чтобы оценить вносимую этим сдвигом НСП, необходимо определить магнитное поле вдоль траектории полёта атомов. Для этого измеряется сдвиг частоты из-за эффекта Зеемана первого порядка в зависимости от высоты подброса атомов. На основе этих данных найдём функцию распределения магнитного поля $B_Z(H)$ по траектории полёта атомов:

$$B_Z(H) = \overline{B_Z(H)} + \frac{1}{\pi} \int_0^h \frac{(\overline{B_Z(H)} - B_Z(H)) \sqrt{y}}{(H-y)^{3/2}} dy,$$

где $\overline{B_Z(H)}$ – среднее по времени полёта облака значение магнитной индукции на рабочей высоте; H – высота подброса облака относительно центра резонатора; $B_Z(y)$ – приближённое значение магнитной индукции, полученное линейной интерполяцией измеренных точек.

По значениям $B_Z(y)$ рассчитывается среднеквадратическое отклонение магнитной индукции поля от среднего значения для рабочей высоты $\overline{B_Z(H)}$, которое составляет 0,15 нТ, что соответствует $1,8 \cdot 10^{-19}$ для относительной частоты часового перехода.

За весь интервал времени наблюдений частота магниточувствительного перехода рубидиевого репера частоты фонтанного типа менялась не более чем на $\pm 0,3$ Гц. Таким образом, оценочное значение сдвига частоты часового перехода из-за эффекта Зеемана второго порядка составляет $\Delta f_{Z2}/f_0 = (121,88 \pm 0,09) \cdot 10^{-15}$.

Эффект излучения чёрного тела. Во время полёта атомов в СВЧ-резонаторе на них воздействует электромагнитное поле, излучаемое стенками пролётного пространства. Этот эффект приводит к смещению частоты часового перехода, относительное значение которого может быть вычислено по формуле [7]:

$$\frac{\Delta f_{BBR}}{f_0} = \beta \left(\frac{T}{300\text{K}} \right)^4 \left[1 + \left(\frac{T}{300\text{K}} \right)^2 \right],$$

где Δf_{BBR} – сдвиг частоты вследствие излучения чёрного тела; T – температура.

Неопределённость расчёта коэффициентов $\beta = -1,256(4) \cdot 10^{-14}$, $\varepsilon = 0,011$ [8, 9] приводит к неопределённости относительного сдвига частоты $4 \cdot 10^{-17}$.

Во время измерений рубидиевый репер частоты находился в лабораторном помещении, где температура воздуха поддерживалась на уровне $(295,7 \pm 0,3)$ К. Постоянный контроль температуры осуществлялся тремя платиновыми

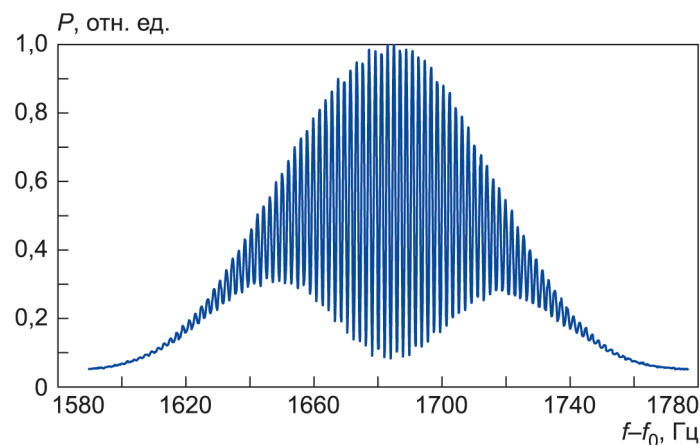


Рис. 3. Зависимость вероятности P магниточувствительного атомного перехода ($F=1, m_F=1 \rightarrow F=2, m_F=1$) от отстройки частоты опросного сигнала (резонанс Рэмси)

Fig. 3. Probability of a magnetically sensitive atomic transition ($F=1, m_F=1 \rightarrow F=2, m_F=1$) versus frequency of the interrogation signal (Ramsey fringes)

термодатчиками TP100: два установлены на корпусе СВЧ-резонатора и один за магнитными экранами. Среднеквадратическое отклонение температуры пролётного пространства за одну неделю составило 0,13. Таким образом, учитывая неопределённость коэффициентов β , ε , суточные изменения температуры пролётного пространства и неопределённость показаний термодатчика, получим сдвиг частоты, вызванный эффектом излучения чёрного тела:

$$\Delta f_{BBR}/f_0 = (-11,97 \pm 0,06) \cdot 10^{-15}.$$

Гравитационный эффект. Поскольку определение секунды основано на истинном времени, то согласно общей теории относительности при сравнении частот двух стандартов, находящихся в разных точках, необходимо учитывать влияние потенциала Φ [10]. Φ – потенциал, в котором учитываются вклады гравитационного ускорения и центростремительного ускорения, связанного с вращением рассматриваемого стандарта. Если система отчёта вращается вместе с геоидом, то относительный сдвиг частоты из-за гравитационного эффекта можно выразить как

$$\Delta f_G/f_0 = gh_g/c^2,$$

где Δf_G – сдвиг частоты вследствие гравитационного эффекта, g – ускорение свободного падения; h_g – высота над поверхностью геоида; c – скорость света в вакууме.

Рубидиевый репер частоты фонтанного типа располагается на высоте $(222,2 \pm 0,1)$ м над геоидом в балтийской системе координат. Таким образом, относительный сдвиг частоты часового перехода вследствие гравитационного эффекта вычисляется по формуле

$$\Delta f_G/f_0 = (-24,27 \pm 0,01) \cdot 10^{-15}.$$

Эффект затягивания резонатором. Для функционирования рубидиевого репера частоты фонтанного типа в СВЧ-резонаторе спектрографа необходимо возбуждать моду типа H_{011} на частоте $6,834682611$ ГГц, соответствующей частоте часового атомного перехода. Отстройка частоты резонатора от указанного значения вызывает сдвиг измеряемой частоты, который может быть выражен как [11]:

$$\frac{\Delta f_{\text{зтг}}}{f_0} = \frac{8Q_p^2}{f_0 \pi^2 Q_a^2} \Delta_p b \text{ctg}(b), \quad (2)$$

Бюджет неопределённости рубидиевого репера частоты фонтанного типа

Физический эффект	$(\Delta f/f) \cdot 10^{-15}$	$\sigma_i \cdot 10^{-15}$
Квадратичный эффект Зеемана	121,88	0,09
Излучение чёрного тела	-11,97	0,06
Гравитационный эффект	24,27	0,01
Затягивание резонатора	–	0,028
НСП	–	0,12

где $\Delta f_{\text{зтг}}$ – сдвиг частоты вследствие затягивания резонатором; Q_p , Q_a – добротности СВЧ-резонатора и атомного резонанса; b – коэффициент, определяющий мощность импульса Раби при взаимодействии атома с СВЧ-полем; Δ_p – отстройка собственной частоты резонатора относительно частоты атомного перехода.

В репере частоты фонтанного типа при нормальном режиме работы импульс Раби основного СВЧ-резонатора равен $\pi/2$, поэтому сдвиг из-за эффекта затягивания резонатора равен нулю. Однако вследствие изменения температуры резонатора появляется неопределённость коэффициента b , которая не превышает 10 %. Таким образом, из выражения (2) следует, что при $Q_p \approx 28600$, $Q_a = 6,834 \cdot 10^9$, неопределённости b 10 % и отстройке $\Delta_p = 50$ кГц составляющая НСП из-за этого эффекта составляет $2,8 \cdot 10^{-17}$.

В таблице приведён бюджет неопределённости рубидиевого репера частоты фонтанного типа по результатам предварительных исследований. В указанный бюджет вошли эффекты, вносящие основной вклад в сдвиг измеряемой частоты ($\Delta f/f$ – относительный сдвиг частоты). Суммарная НСП рассчитана как

$$\sigma = \left(\sum_i \sigma_i^2 \right)^{1/2},$$

где σ_i – неопределённость сдвига частоты из-за рассмотренного физического эффекта, составила менее $2 \cdot 10^{-16}$.

Заключение. В ходе метрологических исследований рубидиевого репера частоты фонтанного типа рассмотрены физические эффекты, вызывающие наибольший сдвиг измеряемой частоты. Полученная оценка НСП воспроизведения единицы частоты находится на уровне менее $2 \cdot 10^{-16}$. Показано, что СКДО составило $\sigma_y(\tau) = 1,43 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$, что находится на уровне лучших стандартов частоты фонтанного типа в мире. Полученные результаты делают возможным включение разработанного рубидиевого репера в состав ГЭТ 1-2018.

Список источников

1. Блинов И. Ю., Бойко А. И., Домнин Ю. С., Костромин В. П., Купалова О. В., Купалов Д. С. Бюджет неопределённостей цезиевого репера частоты фонтанного типа // Измерительная техника. 2017. № 1. С. 23–27.
2. Recommendation Adopted by the International Committee for Weights and Measures, Session I of the 102nd meeting of the CIPM, 2013, available at: <https://www.bipm.org/documents/20126/34443817/CIPM2013-EN.pdf/e2c25a47-64c0-b348-966c-253494015fb7> (дата обращения: 20.09.2021)
3. Павленко К. Ю., Павленко Ю. К., Беляев А. А., Блинов И. Ю., Хромов М. Н., Биз С., Лорини Л. Создание первого в России хранителя частоты и времени на основе фонтана охлажденных атомов рубидия // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 10. С. 967–972. <http://dx.doi.org/10.1070/QEL16778>
4. Купалов Д. С., Барышев В. Н., Блинов И. Ю., Бойко А. И., Домнин Ю. С., Копылов Л. Н., Купалова О. В., Новоселов А. В., Хромов М. Н. Хранитель единиц времени и частоты на основе

«фонтана» атомов рубидия // Альманах современной метрологии. 2018. № 15. С. 31–41.

5. Breit G., Rabi I. I., *Phys. Rev.*, 1931, no. 38, pp. 2082–2083. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.38.2082.2>

6. Arimondo E., Inguscio M. and Violino P., *Review of Modern Physics*, 1977, no. 49, pp. 31–75.

<http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.49.31>

7. Pal'chikov V. G., Domnin Yu. S. and Novoselov A. V., *J. Opt. B: Quantum and Semiclass.*, 2003, no. 5, pp. 131–135.

<https://doi.org/10.1088/1464-4266/5/2/370>

8. Angstmann E. J., Dzuba V. A. and Flambaum V. V., *Phys. Rev. A*, 2006, vol. 74, no. 2, 023405.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.74.023405>

9. Safronova M., Jiand D., Safronova U., *Phys. Rev.*, 2010, A82, 022510. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.82.022510>

10. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения: Пер. с англ. М.: Физматлит, 2009. 512 с.

11. Ovchinnikov Y., Marra G., *Metrologia*, 2011, no. 48, pp. 87–100. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/3/003>

References

1. Blinov I. Yu., Boiko A. I., Domnin Yu. S., Kostromin V. P., Kupalova O. V., Kupalov D. S., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 30–36. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1145-z>

2. Recommendation Adopted by the International Committee for Weights and Measures, Session I of the 102nd meeting

of the CIPM, 2013, available at: <https://www.bipm.org/documents/20126/34443817/CIPM2013-EN.pdf/e2c25a47-64c0-b348-966c-253494015fb7> (accessed: 20.09.2021)

3. Pavlenko K. Yu., Pavlenko Yu. K., Belyaev A. A., Blinov I. Yu., Khromov M. N., Bize S., Lorini L., *Quantum Electronics*, 2018, vol. 48, no. 10, pp. 967–972. <http://dx.doi.org/10.1070/QEL16778>

4. Kupalov D. S., Baryshev V. N., Blinov I. Yu., Boyko A. I., Domnin Yu. S., Kopylov L. N., Kupalova O. V., Novoselov A. V., Khromov M. N., *Al'manakh sovremennoi metrologii*, 2018, no. 15, pp. 31–41. (In Russ.)

5. Breit G., Rabi I. I., *Phys. Rev.*, 1931, no. 38, pp. 2082–2083. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.38.2082.2>

6. Arimondo E., Inguscio M. and Violino P., *Review of Modern Physics*, 1977, no. 49, pp. 31–75.

<http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.49.31>

7. Pal'chikov V. G., Domnin Yu. S. and Novoselov A. V., *J. Opt. B: Quantum and Semiclass.*, 2003, no. 5, pp. 131–135.

<https://doi.org/10.1088/1464-4266/5/2/370>

8. Angstmann E. J., Dzuba V. A. and Flambaum V. V., *Phys. Rev. A*, 2006, vol. 74, no. 2, 023405.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.74.023405>

9. Safronova M., Jiand D., Safronova U., *Phys. Rev.*, 2010, A82, 022510. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.82.022510>

10. Riehle F., *Frequency Standards*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004, 526 p.

11. Ovchinnikov Y., Marra G., *Metrologia*, 2011, no. 48, pp. 87–100. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/3/003>

Статья поступила в редакцию 02.08.2021; одобрена после рецензирования 10.09.2021; принята к публикации 13.09.2021.
The article was submitted 02.08.2021; approved after reviewing 10.09.2021; accepted for publication 13.09.2021.

Датчики импульсного давления: критерии применимости

Андрей Александрович Недбайло

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е. И. Забабахина, Снежинск, Челябинская обл., Россия, omit@vniitf.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема поиска и верификации критериев выбора датчика определённого типа в зависимости от предполагаемого входного воздействия – критериев применимости датчика импульсного (динамического) давления, основанных на его динамических характеристиках. Систематизированы существующие положения в области измерения импульсных давлений. Экспериментально исследованы динамические характеристики датчиков импульсного давления нескольких типов, получены их передаточные функции и смоделированы отклики датчиков на задаваемое входное воздействие. Предложен экспериментальный метод получения передаточной функции с использованием пневматической ударной трубы и прикладных математических программных пакетов. Подтверждено отсутствие единого универсального критерия применимости датчика импульсного давления в зависимости от предполагаемого входного воздействия. Результаты исследования могут быть востребованы при выборе датчика необходимого типа для измерения импульсного (динамического) давления в различных задачах науки и техники.

Ключевые слова: динамическое давление, динамические характеристики, передаточная функция, резонансная частота, ударная труба, критерий применимости

Для цитирования: Недбайло А. А. Датчики импульсного давления: критерии применимости // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 34–40. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-34-40>

The impulse pressure transducers: applicability criteria

Andrey A. Nedbaylo

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia, omit@vniitf.ru

Abstract. The problem of search and verification of criteria of sampling of the transducer of certain type depending on prospective entrance affecting - criteria of usability of the impulse (dynamic) pressure transducer, based on its dynamic characteristics is observed. Thus similar transducers are widely used at research fluid-gas-dynamics processes. Existing rules in the field of measurement of pulsing pressures are systematized. Dynamic characteristics of impulse pressure transducers of several types are experimentally investigated, their transfer functions are gained and responses of transducers to set entrance affecting are simulated. The experimental method of reception of a transfer function with use of a pneumatic shock tube and applied mathematical software packages is offered. Absence of uniform universal criterion of usability of the impulse pressure transducer depending on prospective entrance affecting is confirmed. Results of research can be claimed at a choice of necessary type of the transducer at measurement of impulse (dynamic) pressure in various tasks of a science and technics.

Keywords: dynamic pressure, dynamic properties, transfer function, resonant frequency, shock tube, criterion of usability

Введение. В последнее время в России активно возрождается интерес к метрологии импульсных давлений. Для понимания специфики данной области необходимо определить понятие импульсного давления. За рубежом практически не используется термин *impulse pressure*, зато широко применяется *dynamic pressure* – динамическое давление, т. е. давление, изменяющееся во времени преимущественно случайным образом. Российские специалисты-метрологи исторически разделяли переменное давление, т. е. давление, изменяющееся во времени по гармоническому или квазигармоническому закону, и импульсное давление, форма изменения которого носит случайный характер или же аппроксимируется простой геометрической фигурой: пепадом (ступенью), полусинусом, колоколом, трапецией,

затухающей экспонентой и т. д. Метрология импульсного давления сводится к поэлементной оценке составляющих погрешностей измерительного канала, состоящего из первичного измерительного преобразователя (датчика), усилительно-согласующей аппаратуры и цифрового регистратора. Если характеристики усилительно-согласующей аппаратуры и цифрового регистратора можно исследовать общеизвестными методами, применяемыми для радиоэлектронной аппаратуры, то для датчиков необходимо физическое воздействие, максимально приближённое к реальным условиям эксплуатации. При этом на сегодняшний день автору настоящей статьи известен лишь один документ, в полной мере описывающий методологию исследований датчиков динамического давления: ISA-37.16.01-2002 "A Guide

for the dynamic calibration of pressure transducers" (США). Согласно указанному стандарту основными исследуемыми характеристиками являются коэффициент преобразования и динамические параметры: резонансная частота, время нарастания, коэффициент демпфирования, перерегулирование (выброс). При этом не существует чётких, общепризнанных критериев применимости датчиков динамического давления, основанных на значениях вышеперечисленных характеристик или взаимоотношений между ними, к тому или иному входному импульсному воздействию.

Цели данной работы – исследование динамических характеристик датчиков импульсного (динамического) давления, разработка метода получения индивидуальной передаточной функции и оценка возможности существования универсального критерия применимости датчика импульсного давления.

Теоретические основы исследования. Коэффициент преобразования – это основополагающая характеристика датчика. Для определения коэффициента преобразования разрабатываются различные эталонные установки, призванные обеспечить динамическую калибровку датчика в условиях, максимально приближенных к реальным. В области давлений до 10 МПа и длительностей фронта нарастания 5–10 мкс используются пневматические ударные трубы с неопределённостью калибровки не менее 3–7 %. Альтернативный вариант – установки, работающие по принципу быстрого клапана: полость камеры с избыточным давлением, измеренным прецизионным статическим манометром, при открытии клапана соединяется с подклапанной полостью, в которой расположена мембрана чувствительного элемента датчика. Для определения коэффициента преобразования датчика нецелесообразно применять периодические калибраторы (газовые с ротором и отверстием, жидкостные с использованием вибростендов, жидкостные с мембраной и пьезоактюатором), так как в их состав практически всегда входит эталонный датчик, откалиброванный на апериодической установке [1–4]. Это справедливо и для установок копрового класса, в которых реализуется метод удара по неуплотнённому поршню в цилиндре с жидкостью. Попытки использовать абсолютный метод измерения в данных установках пока носят исследовательский характер, по точностным показателям такие установки существенно уступают установкам с быстрым клапаном [5, 6].

По мнению автора настоящей статьи, исследование динамических характеристик датчиков по важности сопоставимо с высокоточным определением коэффициента преобразования и, следовательно, нелинейности функции преобразования датчика. Среди динамических характеристик наиболее важна амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), но она напрямую применяется только для периодических сигналов, т. е. при измерении переменного давления. При измерении кратковременных импульсных сигналов со сложными спектрами по АЧХ датчика можно лишь косвенно (путём моделирования влияния АЧХ на сигналы конкретных форм) оценить погрешность искажения формы зарегистрированного импульса. Набор решений

прямого определения АЧХ при периодическом сигнале технически ограничен верхней граничной частотой 10 кГц.

С практической точки зрения собственная резонансная частота датчика f_p – основополагающая динамическая характеристика, её значение всегда указывается разработчиком датчика. Основным методом исследования f_p является возбуждение собственной резонансной частоты датчика в ударной трубе при его расположении в торцевой части (отражённая ударная волна), что с математической точки зрения является воздействием на передаточную функцию датчика функцией Хевисайда. Этим же методом, при котором теоретическое значение времени нарастания фронта давления отражённой ударной волны составляет несколько наносекунд, определяется минимально регистрируемая датчиком длительность фронта τ_ϕ по уровню 0,1–0,9. На рис. 1 показана переходная функция (идеализированный отклик) датчика. В нескольких установках [7, 8] реализован другой способ воздействия на датчик условной дельта-функцией Дирака – взрыв проволоки в жидкости (электрогидравлический эффект Л. А. Юткина).

Для оценки значения рабочей верхней граничной частоты f_b периодических сигналов на практике применяется предложенное фирмой Brüel&Kjær (Дания) вычисление неравномерности АЧХ на основе описания математической модели пьезоэлектрического датчика (акселерометра) линейным дифференциальным уравнением второго порядка. Неравномерность АЧХ в относительных единицах согласно [9] определяется как $1/\sqrt{1-(f_b/f_p)^2}$, т. е. для обеспечения погрешности из-за неравномерности АЧХ $\delta_{АЧХ}=5\%$ необходимо выполнение соотношения $f_b \approx f_p/5$. Остаётся открытым вопрос требуемого значения резонансной частоты импульсных сигналов со сложным спектром. Для уменьшения выброса в выходном сигнале датчика должно применяться эмпирическое правило [10]:

$$\tau_\phi f_p \geq 2,5. \quad (1)$$

Например, для полусинусоидального сигнала при допущении $\tau_\phi = 1/(4f_b)$ и переходе из временной области в частотную

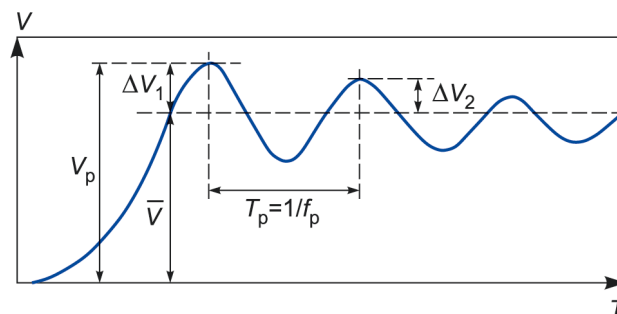


Рис. 1. Теоретический отклик датчика:
 $\Delta V_1, \Delta V_2$ – амплитуды установившегося значения измеряемой величины $\bar{V}$ в моменты времени, отличающиеся на период колебаний T_p ; V_p – пиковое значение

Fig. 1. The theoretical response of the transducer:
 $\Delta V_1, \Delta V_2$ – amplitudes from the steady-state value $\bar{V}$ of measured magnitude, taken at times that differ by the oscillation period T_p ; V_p – peak value

необходимо уже соотношение $f_b \approx f_p/10$. Также в [9] существует подобная формуле (1) соотношение для импульсного процесса относительно измерения ударного ускорения $Tf_p \geq 10$ (где T – длительность импульса) для амплитудной погрешности не более 5 %, т. е. для полусинусоидального сигнала

$$\tau_{\phi} f_p \geq 5. \quad (2)$$

Соотношение, аналогичное формуле (2) для полусинусоидального сигнала, приведено в МИ 107-76 «Методика оценивания погрешности результата измерений пикового ударного ускорения».

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что с использованием генераторов переменного (периодического) давления с верхней граничной частотой 10 кГц невозможно исследовать прямым классическим методом АЧХ современных датчиков с резонансными частотами более 200 кГц и расчётным значением $f_b \geq 40$ кГц.

Также для оценки применимости датчика важны две взаимосвязанные характеристики согласно ISA-37.16.01-2002 и [11]: коэффициент демпфирования и выброс или, как принято в теории управления, перерегулирование. Коэффициент демпфирования ξ рассчитывается по формуле

$$\xi = \left\{ \left[2\pi / \ln(\Delta V_1 / \Delta V_2) \right]^2 + 1 \right\}^{-1/2}, \quad (3)$$

где ΔV_1 , ΔV_2 – амплитуды установившегося значения некоторой измеряемой величины $\bar{V}$ в моменты времени T_1 , T_2 , отличающиеся на период колебаний T_p .

Выброс Δh вычисляется как

$$\Delta h = (V_p - \bar{V}) / \bar{V} \cdot 100, \quad (4)$$

где V_p – пиковое значение измеряемой величины, определяемое по рис. 1.

В ISA-37.16.01-2002 выброс рассматривается как функция коэффициента демпфирования

$$\Delta h = \exp(-\xi \pi / \sqrt{1 - \xi^2}) \cdot 100. \quad (5)$$

Исходя из ISA-37.16.01-2002 и [9] передаточной функцией датчика является колебательное звено (инерционное звено второго порядка)

$$W(s) = K \omega_0^2 / (s^2 + 2\xi \omega_0 s + \omega_0^2),$$

где K – коэффициент преобразования датчика, определённый в квазистатическом режиме; s – комплексная переменная; ω_0 – резонансная частота колебательной системы (звена, датчика).

Резонансная частота колебательной системы определяется по формуле

$$\omega_0 = 2\pi f_p / \sqrt{1 - \xi^2}. \quad (6)$$

Строго говоря, производители датчиков указывают значение не ω_0 , а значение частоты f_p , которая является частотой звона (частотой свободных затухающих колебаний) и определяется в соответствии с рис. 1 на одном или нескольких периодах.

Упоминание в характеристиках датчика значения ξ автору настоящей статьи не встречалось. При этом характеристики f_p , Δh , ξ определяют отклик датчика на импульсное воздействие. Пользователю необходимо их оценивать для корректного измерения амплитудного значения воздействующего давления, поскольку зачастую за него в опыте принимается отклик датчика, обусловленный его недостаточными для условий эксперимента динамическими (частотными) свойствами, по сути – выброс. Кроме упомянутых соотношений (1) и (2), какие-либо другие практические оценки для применимости датчика в конкретных условиях автору настоящей статьи не известны.

Метод исследования динамических характеристик датчиков импульсного (динамического) давления. Метод исследования заключался в экспериментальном получении

Таблица 1

Характеристики датчиков

Тип	Производитель	$P_{\text{впл}},$ МПа	$K_{\text{ном}}$	f_p , кГц, не менее
113B26	“PCB Piezotronics”, США	3	1450 мВ/МПа (ICP)	500
PS01-02	ООО «ГлобалТест», Россия	25	4000 пКл/МПа (зарядовый)	30
T10000	ФКП «НТИИМ», Россия	1000	10 пКл/МПа (зарядовый)	150
T6000		600	20 пКл/МПа (зарядовый)	180
119B02	“PCB Piezotronics”, США	862	36 пКл/МПа (зарядовый)	400
2300C7	“Dytran Instruments, Inc”, США	100	50 пКл/МПа (зарядовый)	500
PWFD-5MPB	“Tokio Sokki Kenkyujo Co., Ltd”, Япония	5	2 мВ/В (тензорезисторный)	90

переходной функции датчика, идентификации его передаточной функции и моделировании отклика датчика на сигнал с переменными параметрами. Исследовали семь моделей датчиков импульсного (динамического) давления, их основные заводские характеристики приведены в табл. 1.

Чтобы в передаточной функции датчика не учитывать влияние АЧХ вторичной аппаратуры, выход датчика подключался к усилительно-согласующей аппаратуре с верхней граничной частотой, превышающей значение f_p , заявленное производителем. Для датчиков с зарядовым и ICP-выходами использовали усилитель 443В102 с действительным значением верхней граничной частоты 650 кГц по уровню –3 дБ,

а для тензорезисторного датчика – усилитель 482C27 с действительным значением верхней граничной частоты 100 кГц. Все указанные усилители производства “PCB Piezotronics” (США). В качестве регистратора применялся 14-битный аналого-цифровой преобразователь USB3000 (НПГ “R-Technology”, Россия) с частотой дискретизации 3 МГц. Для исследования датчиков импульсного давления в Российском федеральном ядерном центре — Всероссийском научно-исследовательском институте технической физики имени академика Е. И. Забабахина спроектирована и изготовлена пневматическая ударная труба. Параметры ударной трубы рассчитывались согласно [12] с учётом требований: максимальное давление за отражённой ударной волной 10 МПа, минимальное время наблюдения при однородных условиях (длительность «полки») 0,5 мс; толкающий газ – атмосферный воздух или гелий (число Маха не более двух). Итоговые параметры трубы из нержавеющей стали: длина отсеков низкого и высокого давления – соответственно 1,9 и 0,35 м; внутренний диаметр 0,055 м; толщина стенки 9 мм (для уменьшения влияния на датчик вибраций стенок трубы при образовании и прохождении плоской ударной волны). Датчик монтировался в стальную торцевую крышку отсека низкого давления, которая отделялась от остального корпуса через уплотнительное резиновое кольцо и паронитовую прокладку. Отличительная особенность конструкции – низкая шероховатость ($Ra=0,16$) внутренней поверхности трубы, необходимая для уменьшения влияния пограничного слоя возле стенок. Экспериментальным путём подобран материал разрушаемой диафрагмы – плёнка ПЭТ-Э (аналог майлара) толщиной не более 0,25 мм, при использовании которой реализуется давление за отражённой волной до 1,2 МПа (гелий), 0,7 МПа (воздух). От применения металлической фольги для повышения уровня давления отказались из-за образования частей разрываемой диафрагмы, царапающих при движении внутреннюю поверхность трубы и негативно воздействующих на диафрагму датчика. Как показали исследования, достигнутый уровень давления 1,2 МПа оказался достаточным для возбуждения резонансных частот датчиков с пределом измерения 1000 МПа. При этом длительность однородных условий за отражённой волной составила не менее 1,3 мс для воздуха и 0,25 мс для гелия. В качестве источника толкающего газа использовался стандартный газовый баллон (15 МПа). Выход баллона через газовый редуктор и трёх-выходной вентиль, стравливающий избыточное давление в трубе после опыта, подключался к отсеку высокого давления. Датчики монтировались в соответствии с эксплуатационной документацией: датчики 113B26, PS01-02, 119B02, 2300C7, PWFD-5MPB – диафрагмой заподлицо, датчики T10000,

Рис. 2. Переходные характеристики датчиков разных типов:
1 – 113B26; 2 – PS01-02; 3 – T10000; 4 – T6000; 5 – 119B02;
6 – 2300C7; 7 – PWFD-5MPB

Fig. 2. Transient responses of the transducers:
1 – 113B26; 2 – PS01-02; 3 – T10000; 4 – T6000; 5 – 119B02;
6 – 2300C7; 7 – PWFD-5MPB

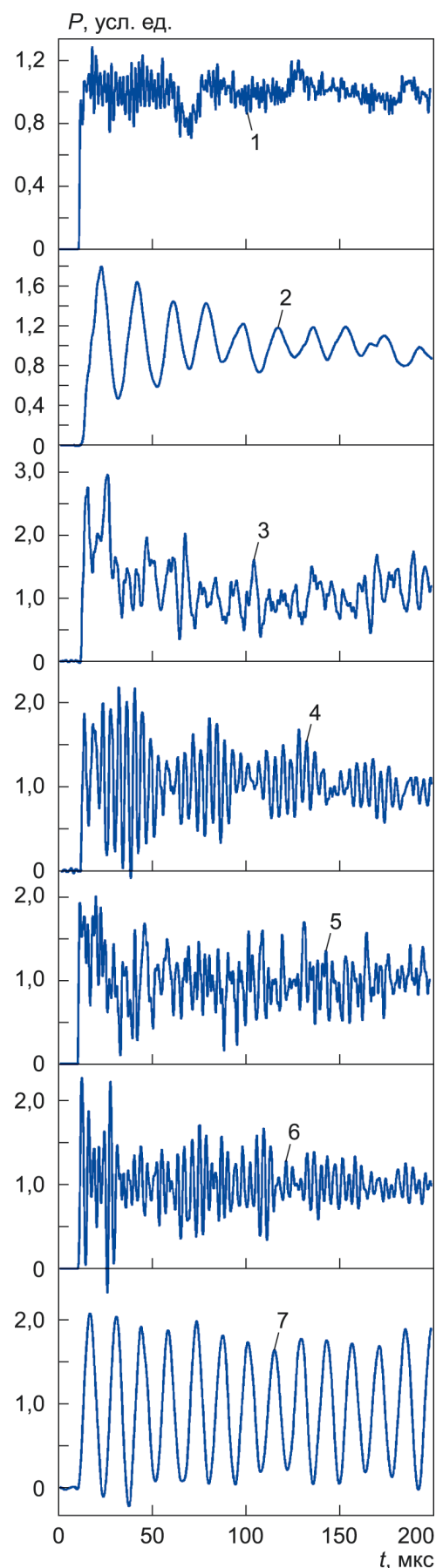


Таблица 2

Результаты экспериментов по получению передаточных функций

Датчик	$f_{p, \text{э}},$ кГц	$\Delta h, \%$	$\delta_a, \%$ при $\tau_{\text{ф}} f_{p, \text{э}} = 2,5$	$\tau_{\text{ф}} f_{p, \text{э}}$ для $\delta_a \leq 5 \%$
113B26	500	18	6,2	4,0
PS01-02	56	80 ($\xi = 0,06$)	4,1	—
T10000	160	290	77,0	62,6
T6000	230	115	22,4	55,2
119B02	410	90	37	16,4
2300C7	320	125	17	10
PWFD-5MPB	72	108 ($\xi = 0,004$)	3,6	—

T6000 – с каналом перед диафрагмой. Согласно общепринятому описанию системы канал-датчик моделью резонатора Гельмгольца, частота возникающих колебаний газа в канале обратно пропорциональна длине канала. Поэтому для оценки влияния канального монтажа на переходную функцию датчика проводились следующие эксперименты. Датчик T10000 устанавливался как заподлицо, так и с каналом длиной 7 мм. При реализуемом уровне давления в 0,7 МПа для надежной обтюрации в этих случаях достаточно фторопластовой ленты. При канальном монтаже изменилась форма выброса в регистрируемом сигнале с ожидаемым затягиванием фронта нарастания в 5–6 раз по сравнению с монтажом заподлицо. Частота f_p осталась практически неизменной. Поэтому для соответствия условий опыта реальным условиям эксплуатации следующие эксперименты по получению данных для идентификации передаточной функции датчиков T10000, T6000 проводились при штатной, предписанной эксплуатационной документацией, длине канала.

Результаты экспериментов. Формы зарегистрированных и нормализованных к единице переходных функций (характеристик) датчиков приведены на рис. 2. Согласно графикам, только переходные характеристики датчиков PWFD-5MPB и PS01-02 с самыми низкими экспериментальными резонансными частотами $f_{p, \text{э}}$ соответствуют характеристике колебательного звена, что позволяет определить ξ . Для датчиков с большим верхним пределом измерения, особенно для моделей T6000 и T10000, наблюдается значительный, отдельно выраженный выброс, т. е. переходная характеристика индивидуальна и требует детального изучения для каждой модели датчика. Поскольку АЧХ датчика можно получить путём дискретного преобразования Фурье его импульсной характеристики (импульсной переходной функции), в исследовании проверена правомерность повсеместного применения отношения $f_b \approx f_p/5$ для $\delta_{\text{АЧХ}} \leq 5 \%$ при измерении переменного давления. Для получения импульсной характеристики экспериментальная переходная характеристика дифференцировалась. Данный метод позволяет провести качественную оценку, хотя в [13] указано, что при этом вследствие ошибки дифференцирования увеличивается неопределённость результата. Установлено, что отношение $f_b \approx f_p/5$ для $\delta_{\text{АЧХ}} \leq 5 \%$ удовлетворительно согласуется с экспериментальной оценкой, при которой полученная неравномерность АЧХ датчиков $\delta_{\text{АЧХэ}} \leq 7 \%$ для аналогичного отношения. Также проводились эксперименты

согласно [14], в которых возбуждение резонансных частот вызывалось ударом стального шарика по диафрагме датчика (имитация воздействия дельта-функции Дирака). По сравнению с методом ударной трубы значение $f_{p, \text{э}}$ уменьшилось до 30 %.

Дальнейшая обработка экспериментальных данных происходила следующим образом. В момент появления фронта отклика датчика в данные добавлялся искусственный сигнал единичной ступени (функции Хевисайда), который моделировал идеальное ступенчатое воздействие в отражённой ударной волне. Поскольку для данного исследования значение коэффициента преобразования датчика и его линейность не принципиальны, полученный сигнал датчика нормировался к единичному значению на конечном участке (участке установившегося значения). Массивы данных (искусственного входного сигнала и реального выходного) загружались в пакет “System Identification Toolbox” программы MATLAB, где происходила идентификация передаточной функции датчика итерационным способом. Наиболее совпадающими с экспериментальными данными (уровень совпадения более 70 %) оказались непрерывные (описывающие поведение системы для всех моментов времени за определенный промежуток) модели передаточной функции вида

$$\frac{B(S)}{A(S)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n}; \quad m \in [5 \dots 24]; \quad n \in [6 \dots 25].$$

Переходными характеристиками, обеспечивающими аналогичный уровень совпадения для модели колебательного звена, оказались лишь вышеупомянутые характеристики датчиков PS01-02 и PWFD-5MPB, что ещё раз свидетельствует об отсутствии единого универсального типа передаточной функции датчика импульсного давления. При этом расхождения между параметрами полученных передаточных функций колебательного звена и параметрами, вычисленными по формулам (3), (6), не превышают 5 %. Однако расхождения между значениями выброса, вычисленными по формулам (4), (5), достигают 14 %.

Полученные модели характеристических полиномиальных передаточных функций передавались в пакет моделирования динамических систем “Simulink” программы MATLAB, в котором моделировался отклик датчика на входное ступенчатое воздействие единичной амплитуды с растянутым по длительности $\tau_{\text{ф}}$ передним фронтом. Форма сигнала «ступень» была выбрана как наиболее часто встречающаяся в реальных экспериментах. Определялось амплитудное (максимальное) отклонение выходного сигнала δ_a от единичного значения при $\tau_{\text{ф}}$ из отношения (1), а также действительное значение произведения $\tau_{\text{ф}} f_{p, \text{э}}$, при котором $\delta_a \leq 5 \%$. Результаты экспериментов по получению передаточных функций датчиков приведены в табл. 2.

Согласно табл. 2 для двух последних датчиков действительное значение резонансной частоты меньше заявленного производителем. Отмечается существенный выброс для всех датчиков, за исключением датчика 113B26. По результатам моделирования выполнение отношений (1) или (2) не обеспечивает $\delta_a \leq 5 \%$ для более чем половины исследуемых датчиков.

Для оценки качества моделирования проводился следующий эксперимент. Датчики устанавливались в одно сечение ещё одной пневматической ударной трубы квадратного профиля

Таблица 3

Результаты экспериментов и моделирования при увеличенной длительности фронта

Датчик	$\Delta h_z, \%$	$\Delta h_m, \%$	$\Delta h_m - \Delta h_z, \%$
113B26	0	7	7
PS01-02	84	47	-37
T10000	86	96	10
T6000	67	41	-26
119B02	43	38	-5
2300C7	22	20	-2
PWFD-5MPB	62	58	-4

со стороны 100 мм. Толкающий газ – воздух, материал диафрагм – алюминий. Уровень создаваемого перепада давления при проходящей ударной волне 0,12–0,3 МПа. За значение длительности фронта реализуемого ступенчатого воздействия принималась длительность фронта, измеренная датчиком 113B26 как наиболее высокочастотным и имеющим наилучшее (максимальное из представленной выборки) пространственное разрешение. В экспериментах удалось увеличить длительность фронта до $\tau_{ф.з} \approx 7$ мкс по уровню 0,1–0,9. Используя ранее полученные полиномиальные передаточные функции датчиков, в пакете “Simulink” моделировали их отклики на входное ступенчатое воздействие с длительностью фронта $\tau_{ф.з}$. Нормализованные результаты экспериментов и моделирования при увеличенной длительности фронта представлены на рис. 3 и в табл. 3.

По данным табл. 3 и рис. 3 можно сделать вывод об удовлетворительном качестве моделирования поведения датчиков в реальных условиях эксплуатации при учёте неидеальности аппроксимации реальной проходящей ударной волны принятым при моделировании ступенчатым воздействием, а также особенности монтажа датчиков.

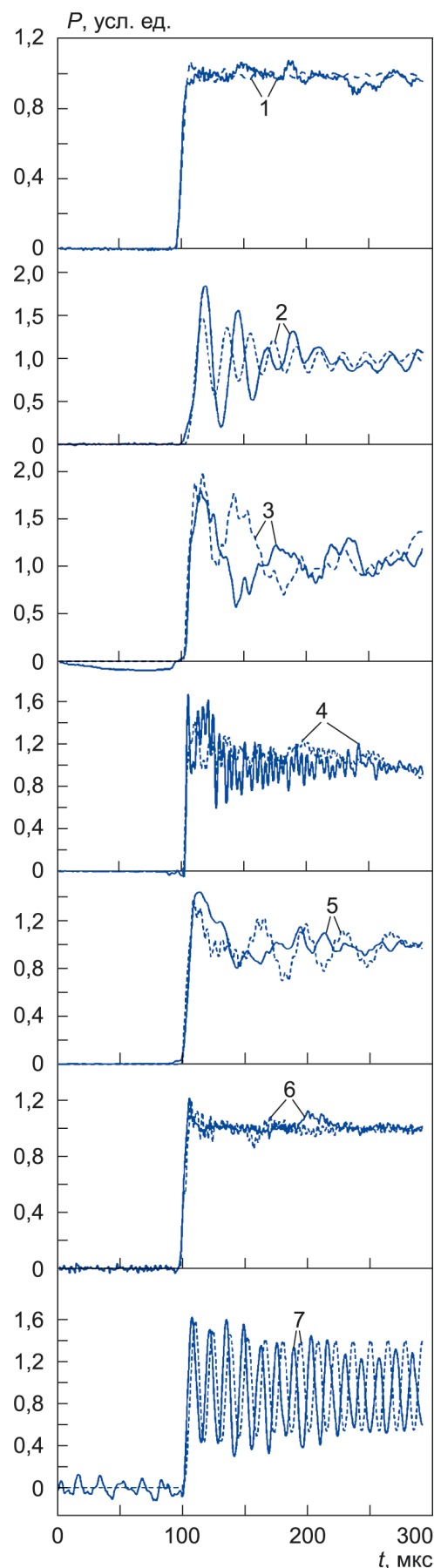
Закключение. Показана ошибочность безусловного соответствия передаточной функции датчиков импульсного (динамического) давления одной универсальной модели – колебательному звену. Результаты экспериментов и моделирования подтверждено отсутствие единого универсального, основанного только на значении резонансной частоты датчика критерия применимости датчика импульсного давления к предполагаемому входному воздействию. Применяемые на практике подобные критерии имеют качественный характер и справедливы далеко не всегда. Продемонстрирован метод получения индивидуальной передаточной функции. Описанный эмпирический метод

Рис. 3. Отклик датчиков, результаты экспериментов (сплошная линия) и моделирования (пунктир) при увеличенной длительности фронта:

1 – 113B26; 2 – PS01-02; 3 – T10000; 4 – T6000; 5 – 119B02;
6 – 2300C7; 7 – PWFD-5MPB

Fig. 3. Results of experiments and modelling of the response of transducers at the increased rise time: solid line – experimental signals; dot line – simulated signals:

1 – 113B26; 2 – PS01-02; 3 – T10000; 4 – T6000; 5 – 119B02;
6 – 2300C7; 7 – PWFD-5MPB



получения передаточной функции позволяет осуществить моделирование поведения конкретной конструкции датчика в реальных условиях эксплуатации и, соответственно, выбрать для требуемых импульсных измерений вариант первичного измерительного преобразователя.

Список источников

1. Bean V. E., Dynamic Pressure Metrology, *Metrologia*, 1994, vol. 30, iss. 6, pp. 737–741. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/30/6/037>
2. Tomasi L., Wieser E., Baruah E., Collomb D., Jolly F., Krötz G., Storm S., Jänker P., Obermeier E., Development of a new piezoelectric dynamic pressure generator for high pressure periodic and aperiodic calibration, *Proceedings of the XVII IMEKO World Congress*, Dubrovnik, Croatia, June 22–27, 2003, IMEKO and HMD Publ., 2003, pp. 1995–1996.
3. Tsing T. T., Ho Ch., Chen L. Ch., Wu J. L., Han L. L., *Measurement science and technology*, 2003, vol. 14, pp. 1927–1337. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/11/010>
4. Elkarous L., Coghe F., Pirlot M., Golinval J. C., *J. Phys., Conf. Ser.*, 2013, no. 459, 012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/459/1/012048>
5. Bruns Th., Franke E., Kobusch M., *Metrologia*, 2013, no. 50, pp. 580–585. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/50/6/580>
6. Salminen J., Hogstrom R., Saxholm S., Lakka A., Riski K., Heinonen M., *Metrologia*, 2018, vol. 55, no. 2, S52–S59. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaa847>
7. Багдатыев Е. Е., Ефимова А. А., Санина Э. Б. Импульсная установка для идентификации датчиков переменных давлений // Измерительная техника. 1989. № 3. С. 18–19.
8. Кузнецов Е. А. Автоматизированный комплекс для определения статико-динамических характеристик датчиков давления в широком диапазоне температур // Измерительная техника. 1993. № 6. С. 40–43.
9. Серридж М., Торбен Р. Л. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и преусилителям, Дания: Ларсен и сын, 1987, 194 с.
10. Patrick L. Walter, *Shock and Blast Measurement – Rise Time Capability of Measurement Systems?* URL: http://www.pcb.com/contentstore/MktgContent/linkedddocuments/technotes/TN-11-0904_Calculating_Rise_Time.pdf (дата обращения: 05.09.2021).
11. Стрижнев А. Г., Марков А. В., Русакович А. Н. Идентификация объекта управления по переходной характеристике замкнутой системы // Доклады БГУИР. 2012. № 5 (67). С. 65–72.
12. Гейдон А., Герл И. Ударная труба в химической физике высоких температур. Пер. с англ. М.: Мир, 1966. 428 с.
13. Matthews C., Pennecchi F., Eichstädt S., Malengo A., Esward T., Smith I., Elster C., Knott A., Arrhen F., Lakka A., *Metrologia*, 2014, vol. 51, no. 3, pp. 326–338. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/3/326>
14. Шипунов А. В. Определение динамических характеристик пьезоэлектрических датчиков давления: сравнительный

анализ методов // Приборы и системы управления. 1999. № 7. С. 35–37.

References

1. Bean V. E., Dynamic Pressure Metrology, *Metrologia*, 1994, vol. 30, iss. 6, pp. 737–741. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/30/6/037>
2. Tomasi L., Wieser E., Baruah E., Collomb D., Jolly F., Krötz G., Storm S., Jänker P., Obermeier E., Development of a new piezoelectric dynamic pressure generator for high pressure periodic and aperiodic calibration, *Proceedings of the XVII IMEKO World Congress*, Dubrovnik, Croatia, June 22–27, 2003, IMEKO and HMD Publ., 2003, pp. 1995–1996.
3. Tsing T. T., Ho Ch., Chen L. Ch., Wu J. L., Han L. L., *Measurement science and technology*, 2003, vol. 14, pp. 1927–1337. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/11/010>
4. Elkarous L., Coghe F., Pirlot M., Golinval J. C., *J. Phys., Conf. Ser.*, 2013, no. 459, 012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/459/1/012048>
5. Bruns Th., Franke E., Kobusch M., *Metrologia*, 2013, no. 50, pp. 580–585. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/50/6/580>
6. Salminen J., Hogstrom R., Saxholm S., Lakka A., Riski K., Heinonen M., *Metrologia*, 2018, vol. 55, no. 2, S52–S59. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaa847>
7. Bagdat'ev E. E., Efimova A. A., Sanina E. B., *Measurement Techniques*, 1989, no. 32, pp. 212–213. <https://doi.org/10.1007/BF00865299>
8. Kuznetsov E. A., *Measurement Techniques*, 1993, no. 36, pp. 682–686. <https://doi.org/10.1007/BF00980016>
9. Mark Serridge, Torben R. Licht, *Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers: Theory and Application Handbook*, Denmark, K. Larsen and Son A/S, 1987, 160 p.
10. Patrick L. Walter, *Shock and Blast Measurement – Rise Time Capability of Measurement Systems?*, available at: http://www.pcb.com/contentstore/MktgContent/linkedddocuments/technotes/TN-11-0904_Calculating_Rise_Time.pdf (accessed: 05.09.2021).
11. Stryzniou A. G., Marcov A. V., Rusakovich A. N., Control object identification using closed-loop system transient response, *Doklady BGUIR*, 2012, no. 5, pp. 65–72. (In Russ.)
12. A. G. Gaydon, I. R. Hurlé, *The shock tube in high-temperature chemical physics*, Chapman and Hall Ltd, London, 1963, 367 p.
13. Matthews C., Pennecchi F., Eichstädt S., Malengo A., Esward T., Smith I., Elster C., Knott A., Arrhen F., Lakka A., *Metrologia*, 2014, vol. 51, no. 3, pp. 326–338. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/3/326>
14. Shipunov A. V., *Opređenje dinamičkih karakteristika p'ezoelektričkih datchikov davleniya: sravnitel'nyi analiz metodov* [Determination of the dynamic characteristics of piezoelectric pressure sensors: a comparative analysis of methods], *Pribory i sistemy upravleniya*, 1999, no. 7, pp. 35–37. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 12.05.2021; одобрена после рецензирования 29.06.2021; принята к публикации 06.07.2021.
The article was submitted 12.05.2021; approved after reviewing 29.06.2021; accepted for publication 06.07.2021.

Метод пирометрии с мобильными жаростойкими экранами

Михаил Александрович Денисов

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия, denisov46@mail.ru

Аннотация. Исследованы возможности увеличения точности бесконтактных температурных измерений. Предложен метод пирометрии поверхностей, при котором погрешности, обусловленные фоновым излучением сторонних излучателей, уменьшены с помощью перемещаемых отражающих экранов. Измерения температуры проведены серийным узкоугольным пирометром, визированным на поверхность через отверстие в полости экрана из волокнистого жаростойкого материала. Представлены результаты серии экспериментов, обосновывающих содержание и параметры операций метода измерений. В частности, отмечено понижение реальной температуры измеряемой поверхности приблизительно на 20–25 °С при вводе неохлаждаемых экранов в камеру теплового агрегата перед каждым измерением. Качественные результаты измерения температуры поверхности получены в условиях, когда экраны между измерениями оставались в рабочем пространстве печи, и проводились выравнивающие температуру выдержки экранов в течение 1–2 минут в позициях на поверхности сначала рядом, затем непосредственно над местом измерения температуры. Описаны результаты промышленных испытаний метода измерения. Метод измерения можно применять при технологических измерениях непосредственно на высокотемпературных агрегатах или при периодическом тестировании и определении поправок к показаниям стационарных пирометров.

Ключевые слова: пирометр, отражающие экраны, измерение, температура поверхности, SCADA-система, конструкции экранов

Для цитирования: Денисов М. А. Метод пирометрии с мобильными жаростойкими экранами // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 41–45. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-41-45>

Pyrometry method with mobile heat-resistant screens

Mikhail A. Denisov

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia, denisov46@mail.ru

Abstract. Possibilities of increasing the accuracy of non-contact temperature measurements are investigated. A method of surface pyrometry is proposed, in which the errors caused by the background radiation of third-party emitters are reduced with the help of reflecting screens. Temperature measurements are carried out with a serial narrow-angle pyrometer, sighted at the surface through a hole in the cavity of the screen made of fibrous heat-resistant material. The results of a series of experiments substantiating the content and parameters of the operations of the measurement method are presented. In particular, a decrease in the actual temperature of the measured surface by approximately 20–25 °C was noted when uncooled screens were introduced into the chamber of the thermal unit before each measurement. Qualitative results of measuring the surface temperature were obtained under conditions when the screens remained in the working space of the furnace between measurements, and the temperature leveling of holding the screens in positions on the surface before and during the measurement was carried out for 1–2 minutes. The results of industrial tests of the measurement method are described. The measurement method can be used for technological measurements directly on high-temperature units or for periodic testing and determination of corrections to the readings of stationary pyrometers.

Keywords: pyrometer, reflective screens, measurement, surface temperature, SCADA-system, screen designs

Введение. Для управления тепловыми технологическими процессами необходим надёжный контроль температуры поверхностей в рабочем пространстве агрегатов. Температура обычно контролируется трудоёмкими контактными методами измерений, имеющими ограниченное применение и плохо подходящими для непрерывных измерений. Использованию бесконтактных методов измерения температуры поверхностей во многих огневых камерах мешает неопределённость оптических свойств измеряемых поверхностей и среды, засветка поверхностей излучением более горячих стенок. Поэтому в отверстия в стенках огневых

камер устройств нагрева металла часто вставляют огнеупорные стаканы. Температуры внутри стаканов измеряются пирометрами или термопарами [1]. Результаты измерений считаются усреднённой температурой в камере печи, и по этой температуре ведётся технологический процесс. Для более надёжного измерения температуры поверхностей используются пирометры в комплекте с вогнутым сферическим рефлектором, который добавляет к собственному излучению поверхности отражённое экраном излучение [2, 3]. При этом уменьшается зависимость результатов измерения от степени черноты поверхности. Вариант такой конструкции

прибора исследован в [4]. В работе [5] показано, что для измерений необязательно применять приборы индивидуальной конструкции. В измерительных устройствах можно использовать отдельные отражающие экраны в комплекте с разнообразными серийными узкоугольными пирометрами. Но для получения стабильных и надёжных результатов внутреннюю поверхность экранов желательно охлаждать. В [6–8] описаны приборы для локальных измерений в труднодоступных местах, отрабатываются методы спектральной пирометрии для объектов с неизвестной излучательной способностью, разрабатываются новые методологические подходы, позволяющие создавать пирометры с улучшенными метрологическими характеристиками.

Описанные выше методы измерений и приборы с экранами сложно применять в реальных высокотемпературных агрегатах, поскольку или отсутствует доступ к измеряемой поверхности, или приборы трудно защитить от перегрева во время измерений, или производственные условия создают проблемы для реализации метода. Поэтому на практике пирометры в огневых камерах устанавливают так, чтобы минимизировать неизбежные погрешности измерений. Иногда измерения выполняют двумя пирометрами [9], но и этим методом корректно определить эффективную температуру горячих стенок огневых камер трудно из-за неравномерности их температуры, значительного поглощения газовым неизоотермическим объёмом падающего на измеряемую поверхность излучения, а также из-за трудности определения фактических оптических характеристик стенок и среды.

Цель исследования – разработка бесконтактного метода высокотемпературной пирометрии с применением серийных приборов. Метод обеспечит малые погрешности от

фонового излучения сторонних источников и зависимость от неточного определения оптических характеристик.

Метод бесконтактного измерения температуры поверхностей. Для разработки нового метода бесконтактного измерения температуры поверхностей использованы данные [5] о возможности конструктивного разделения отражающего экрана и пирометра. За основу для испытаний принята система измерения, состоящая из узкоугольного пирометра и огнеупорных экранов разной конструкции, которые имитируют искусственную полость абсолютно чёрного тела на измеряемой поверхности. В лаборатории Уральского федерального университета проведена серия экспериментов, обосновывающих содержание операций метода измерений, параметры, при которых операции выполняются и некоторые конструктивные особенности отражающих экранов.

Эксперименты проводили на установке, представлявшей собой муфельную электропечь СНОЛ-162008/9-М1 (СНОЛ, Литва), в которую помещали пластину из малоуглеродистой стали размером 10×75×170 мм с хромель-алюмелевыми термопарами, имеющими диаметр электродов 0,1 мм. Пластины нагревали при разных режимах до температуры 1050 °С. В процессе нагрева на участок пластины с поверхностной термопарой периодически помещали экраны из волокнистых огнеупорных материалов. Малый размер волокон снижает тепловую инерцию материала и позволяет экранам быстро менять температуру поверхности. В экранах полусферической формы внутренним радиусом 16 мм имелись отверстия для визирования пирометра на участок поверхности под экраном. Измерительные устройства установки подключали к компьютерной системе, отслеживавшей динамику изменения температуры. Схема расположения экранов в рабочей камере установки во время опытов показана на рис. 1.

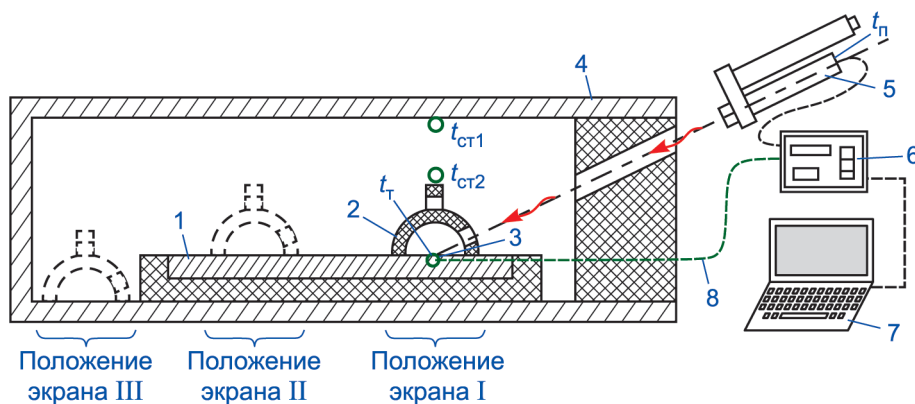


Рис. 1. Схема расположения экранов в опытах:

1 – нагреваемая пластина; 2 – мобильный жаростойкий экран; 3 – термопара, измеряющая t_p на верхней поверхности пластины; 4 – камера печи; 5 – измеряющий t_p пирометр с осью оптической системы, визированной на отверстие в экране; 6 – измерительный прибор; 7 – компьютер с измерительной системой; 8 – связь между измерительным прибором 6, датчиками 3, 5 и компьютером 7

Fig. 1. Layout of screens in experiments:

1 – heated plate with thermocouples; 2 – mobile heat-resistant screen; 3 – thermocouple on the top t_p , lower and center surface of the plate; 4 – furnace chamber; 5 – measuring t_p pyrometer with the axis of the optical system, sighted at the hole in the screen; 6 – measuring device; 7 – computer with SCADA-system; 8 – connection between measuring device 6, sensors 3, 5 and computer 7

Установка состоит из пирометра «Термоскоп-004» (ТС-004, отградуированный пирометр предоставлен ООО «Инфратест», Россия) и экрана из уплотнённого мулитокремнезёмистого волокнистого огнеупора на проволоочном каркасе. Волокнистый огнеупорный материал, широко распространённый на отечественных предприятиях, обладает малой тепловой инерцией и отражательной способностью волокнистой структуры. Характеристики пирометра ТС-004: диапазон измерений 700–1300 °С; максимум спектральной чувствительности 0,85 мкм; показатель визирования 1:500. Диаметр пятна визирования на расстоянии 3 м составляет 6 мм, что позволило сделать в экране отверстие диаметром 8 мм для визирования пирометра на относительно тёмную поверхность пластины. Стабильность измерения достигнута фиксацией пирометра с помощью дополнительных опор.

На установке провели три опыта, результаты приведены на рис. 2 и в таблице. В опыте 1 проверяли оборудование и уточняли

методику измерений. В опыте 2 изменяли конструкцию экрана. Измерения в опытах 1, 2 проводили после ввода холодного экрана в камеру установки в положение I над термопарой, определяющей температуру t_r . Пирометр во время измерений визировали на участок поверхности пластины рядом с термопарой. Измеренные пирометром значения температуры t_n получены с предустановленной степенью черноты поверхности $\varepsilon_m = 1$.

На рис. 2 приведены характерные кривые изменения температуры металла под холодным экраном, полученные в опыте 2 при средней температуре поверхности 915 °С. Температурные кривые показали, что сразу после начала измерения температура t_r понижалась на 20–25 °С в тени экрана и оставалась такой в течение 80–120 с. Приблизительно через 60–80 с после начала измерения разность показаний пирометра и стационарной термопары стабилизировалась. Практически это означает, что измерять температуру поверхностей нагреваемого металла рассмотренным методом с использованием охлажденного экрана можно только после градуировки измерителя.

Результаты динамических измерений температуры в опыте 1 повлияли на методику дальнейших экспериментов. В опытах дополнительно стали фиксировать значения температуры поверхности металла t_r , t_n через 2 мин после установки экрана над стационарной термопарой (см. таблицу). Значения температуры $t_{ст1}$, $t_{ст2}$ в разных точках внутренней поверхности муфеля характеризуют степень неравномерности распределений температуры в камере печи.

Согласно таблице характер изменения температуры во время опытов косвенно подтверждает достоверность результатов измерения: самыми горячими были стенки муфеля – температура t_n поверхности заготовки на 33–41 °С превышала показания t_r стационарной термопары, расположенной приблизительно на расстоянии 0,5–1 мм от верхней поверхности заготовки. Также по данным таблицы можно определить зависимость результатов измерений от размера экрана: меньший по размерам экран вносит меньшие искажения в распределение температуры поверхности металла, но может изменить излучательную способность части поверхности металла, которая находится в поле зрения пирометра (через отверстие в экране).

Часть измерений в опыте 3 повторили с малым экраном с внутренней полусферической поверхностью радиусом 8 мм. Уменьшение размеров экрана на результаты измерений практически не повлияло, но пользоваться экраном стало труднее.

При измерениях в опыте 3 экран из камеры не извлекали. До начала измерения экран не контактировал с плитой в положении III (см. рис. 1) и не охлаждался. Перед измерением экран перекладывали на участок поверхности рядом с точкой измерения температуры t_r поверхностной термопарой (в положение II). В этом положении температура внутренней поверхности экрана уравнивалась с температурой поверхности пластины в течение 2 мин. Затем экран перекладывали в положение I. На пластину через отверстие в экране визировали пирометр ТС-004, и измерительная система фиксировала одновременное изменение температур t_r и t_n . Результаты двух измерений зависимости температуры от времени в опыте 3 приведены на рис. 3. Показания термопары при установке над ней экрана практически не уменьшались: в течение всего времени измерения значения

t_n превышали значения t_r приблизительно на 34 и 28 °С (см. соответственно рис. 3, а, б).

Для определения причины, создающей перепад значений t_r , t_n , в опыте 3 измерения продолжали после выключения электропечи: камера печи медленно остывала, а разность температур внутренней поверхности муфеля и поверхности пластины сначала уменьшилась, а затем практически исчезла (рис. 4). Кривые охлаждения на рис. 4, а показывают, как при выравнивании температуры в камере печи уменьшается перепад температуры в слое окалины на пластине. На рис. 4, б перепада температуры уже нет, показания пирометра и контрольной термопары совпадают. Таким образом, измеряемый перепад значений t_r , t_n формируется тепловым потоком от муфеля печи через экран и слой металла между поверхностью пластины и термопарой. Перепад приближенно соответствует оценочным (расчетным) значениям перепада температуры в слоях металла около поверхности пластины.

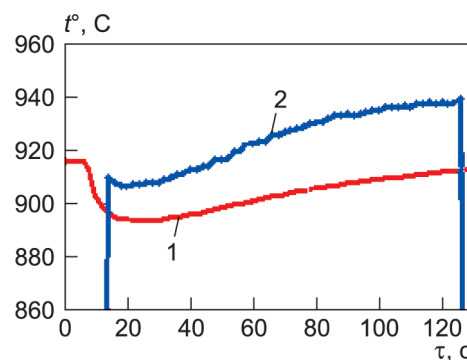


Рис. 2. Изменение во времени температуры поверхности стальной пластины после установки на неё холодного экрана: 1 – t_r ; 2 – t_n

Fig. 2. The time variation of the surface temperature of the steel plate after you install on it a cold screen: 1 – t_r ; 2 – t_p

Результаты измерения температуры поверхности металла

$t_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{г}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ст1}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ст2}}, ^\circ\text{C}$	Режим	$R_{\text{вн}}^*$, мм
Опыт 1 (материал экрана – каолиновая вата)					
747	714	797	812	Нагрев	16
749	716	—	—		
755	718	—	—		
801	763	859	877		
851	817	905	923		
896	863	964	968		
952	915	1002	1019		
982	941	1030	1052		
Опыт 2 (волоконистая плита)					
802	751	851	867	Нагрев	16
923	889	1025	981		
987	952	1046	1052		
1066	1019	1120	1127		
956	923	964	1013	Охлаждение	16
Опыт 3 (волоконистая плита)					
794	749	850	873	Нагрев	16
916	880	991	976		8
888	854	950	939	Охлаждение	16
867	828	870	920		8
883	843	944	948	Нагрев	16

* $R_{вн}$ – внутренний радиус экрана

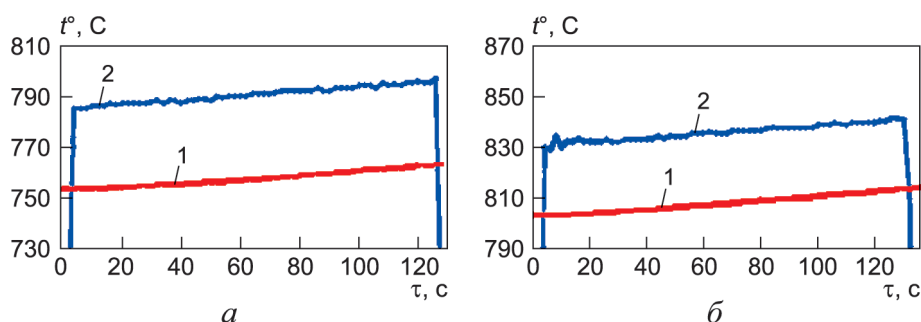


Рис. 3. Изменение во времени температуры в опыте 3 при средней температуре поверхности 770 °C (а) и 820 °C (б): 1 – t_i ; 2 – t_n

Fig. 3. Temperature change over time in experiment 3 at medium temperature surfaces 770 °C (a) and 820 °C (b): 1 – t_i ; 2 – t_p

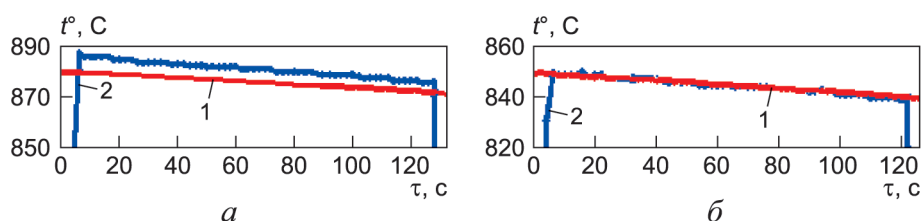


Рис. 4. Изменение во времени температуры поверхности при охлаждении стальной пластины в опыте 3 в начале процесса (а) и через 10 мин (б): 1 – t_i ; 2 – t_n

Fig. 4. Time variation of the surface temperature during cooling of the steel plate in experiment 3 at the beginning of the process (a) and after 10 minutes (b): 1 – t_i ; 2 – t_p

При нагреве металлической пластины с термопарами на поверхности пластины происходит окисление металла с образованием слоя окалины с низкой теплопроводностью. Толщину слоя окалины в экспериментах желательно контролировать в динамике по методикам, описанным в [11]. Но процедура определения толщины слоя окалины трудоёмкая, поэтому оценивали надёжность результатов измерения температуры металла и отработывали метод измерения на другом объекте при промышленных исследованиях.

Промышленные испытания метода измерений. Опыты проводили в печи с шагающим подом № 3 стана 150 Нижне-Сергинского метизно-металлургического завода [10]. В ходе опытов определяли изменение распределений температуры в объёме нагреваемого металла и рабочем пространстве печи, а также изменение параметров теплового режима. Описанный выше в опыте 3 метод пирометрии с мобильными экранами использовали для измерения температуры поверхностей нагреваемых заготовок в балансовых опытах и для предварительного поиска характерных точек пирометрии. Характерными считали точки измерения, в которых обычные промышленные пирометры определяют реальные температуры поверхностей без значительных погрешностей от засветки излучением горячих стенок. Точки измерения выбирали путём сравнения температуры верхней поверхности заготовок, определённой пирометром с мобильным экраном, и температур разных поверхностей, измеренных обычным промышленным пирометром. Невысокая точность измерений связана с большим (14 К) пределом основной допускаемой

погрешности использованного оптического пирометра «Промінь» (СССР). Тем не менее, по итогам сравнения данных для пирометрии температуры металла через боковое окно печи можно рекомендовать визирующие пирометры на верхнюю часть боковой поверхности заготовок, которую от фонового излучения кладки заслоняют соседние заготовки. При измерениях температуры через отверстия в торцевой стенке со стороны выдачи металла пирометр визируют на те участки боковых поверхностей, которые видны в оптической системе пирометра как относительно тёмные узкие полосы между участками более широких и светлых полос – верхних поверхностей заготовок. Эти участки боковых поверхностей не отражают излучение более удалённых от пирометра горячих поверхностей свода и боковых стенок, так как повернуты к внутренней поверхности кладки торцевой стены, температура которой обычно близка к температуре нагретых заготовок.

Обсуждение результатов промышленных экспериментов. В балансовых опытах [10] определены распределение температур нагреваемого металла по длине печи и перепад температуры по

поверхностного слоя окалины. При этом измерены температуры, рассчитаны поля температуры в программе ANSYS Multiphysics (США), сравнены расчётные и экспериментальные данные. Показано, что в начале опытов металл в печи нагревался в условиях, близких к условиям опытов на установке. Расчётные перепады температуры по толщине окалины в диапазоне температуры 750–1100 °C изменялись в пределах 35–45 °C, что практически совпало с результатами непосредственных измерений температуры по методике, описанной в [10]. В настоящей работе получены перепады между температурами t_r , t_n в диапазоне 33–51 °C (см. таблицу). Между поверхностью пластины, на которую визируется пирометр, и рабочим спаем термопары расположен слой окалины и, возможно, очень тонкий слой неокисленного металла. Теплопроводность окалины много меньше теплопроводности металла, поэтому разность значений t_r , t_n приближённо можно считать перепадом температуры по толщине окалины. Это означает, что расчётные и экспериментальные результаты работы [10] приближённо подтверждают достоверность результатов измерений настоящей работы предлагаемым методом пирометрии с мобильными жаростойкими экранами.

Закключение. Предложенный метод измерения позволяет увеличить точность бесконтактного измерения температуры поверхностей в камерах высокотемпературных агрегатов. Работоспособность метода проверена при проведении стендовых и промышленных экспериментов, поэтому метод можно применять для измерений в промышленных тепловых агрегатах и для периодической проверки показаний существующих приборов контроля температуры.

Список источников

1. Беленький А. М., Дубинский М. Ю., Ладыгичев М. Г., Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М. Температура: теория, практика, эксперимент. Справочное издание в 3-х т. Т. 2. Измерение температуры в промышленности и энергетике / Под ред. А. М. Беленького, В. Г. Лисиенко. М.: Теплотехник, 2007. 731 с.

2. Drury M. D., Percy K. P., Land T., Pyrometer for surface temperature measurement, *J. Iron Steel Inst.*, 1951, vol. 169, pp. 245–250.

3. Che X., Xie Z., Notice of Removal: Surface Temperature Measurement with Unknown Emissivity Using a Two-Color Pyrometer Placed with a Reflector, *2017 5th International Conference on Mechanical, Automotive and Materials Engineering (CMAME)*, Guangzhou, China, August 1–3, 2017, IEEE, 2017, pp. 214–217. <https://doi.org/10.1109/CMAME.2017.8540158>

4. Булгак Л. И., Вольфман И. Б., Ефроймович С. Ю., Захаров Г. К. и др. Автоматизация методических печей / Под ред. М. Д. Климовицкого. М.: Metallurgiya, 1981. 195 с.

5. Денисов М. А. Отражающие экраны для пирометрии металлургических процессов // Теория и технология металлургического производства. 2001. № 1. С. 182–186.

6. Müller B., Renz U., *Review of Scientific Instruments*, 2001, vol. 72, 3366. <https://doi.org/10.1063/1.1384448>

7. Магунов А. Н., Лапшинов Б. А., Суворин А. В. Разработка приборов для измерения температуры объектов с неизвестной излучательной способностью. // Инновации. 2015. № 4 (198). С. 13–16.

8. Фрунзе А. В. Методология повышения точности бесконтактных приборов теплового контроля веществ, материалов и изделий: автореф. дис. докт. техн. наук (ТГТУ, Тамбов, 2017).

9. Епишин А. В., Кузнецов В. В., Бегинин Р. С. Измерение температуры металла в печах станов горячей прокатки // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов I Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (TIM'2012). Екатеринбург, Россия, 29–30 марта 2012. Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 46–50.

10. Денисов М. А., Черных В. Н. Метод исследования нагрева окисляющегося металла в программных пакетах инженерного анализа // Изв. вуз. Черная металлургия. 2019. № 1. С. 73–78. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-1-73-78>

11. Темлянтцев М. В., Михайленко Ю. Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. М.: Теплотехник, 2006. 200 с.

Reference

1. Belen'kii A. M., Dubinskii M. Yu., Ladygichev M. G., Lisienko V. G., Shchelokov Ya. M. *Temperatura: teoriya, praktika, eksperiment*,

Spravochnoe izdanie, T. 2, Izmerenie temperatury v promyshlennosti i energetike [Temperature: theory, practice, experiment, Reference edition in 3 volumes, vol. 2, Temperature measurement in industry and power engineering], ed. A. M. Belen'kii, V. G. Lisienko, Moscow, Teplotekhnika Publ., 2007, 731 p. (In Russ.)

2. Drury M. D., Percy K. P., Land T., Pyrometer for surface temperature measurement, *J. Iron Steel Inst.*, 1951, vol. 169, pp. 245–250.

3. Che X., Xie Z., Notice of Removal: Surface Temperature Measurement with Unknown Emissivity Using a Two-Color Pyrometer Placed with a Reflector, *2017 5th International Conference on Mechanical, Automotive and Materials Engineering (CMAME)*, Guangzhou, China, August 1–3, 2017, IEEE, 2017, pp. 214–217. <https://doi.org/10.1109/CMAME.2017.8540158>

4. Bulgak L. I., Vol'fman I. B., Efroyimovich S. Yu., Zakharov G. K. et al., *Avtomatizatsiya metodicheskikh pechei* [Automation of reheating furnaces], ed. M. D. Klimovitskij, Moscow, Metallurgiya Publ., 1981, 195 p. (In Russ.)

5. Denisov M. A., Otrazhajushhie jekrany dlja pirometrii metallurgicheskikh processov [Reflecting screens for pyrometry of metallurgical processes], *Theory and Technology of Metallurgical Production*, 2001, vol. 1, pp. 182–186. (In Russ.)

6. Müller B., Renz U., *Review of Scientific Instruments*, 2001, vol. 72, 3366. <https://doi.org/10.1063/1.1384448>

7. Magunov A. N., Lapshinov B. A., Suvorinov A. V., Razrabotka priborov dlya izmereniya temperatury ob'ektov s neizvestnoi izluchatel'noi sposobnost'yu [Development of devices for measuring the temperature of objects with unknown emissivity], *Innovations*, 2015, no. 4 (198), pp. 13–16. (In Russ.)

8. Frunze A. V., Extended abstract of doctoral dissertation in Technical Sciences (TGTU, Tambov, 2017). (In Russ.)

9. Epishin A. V., Kuznetsov V. V., Beginin R. S., Izmerenie temperatury metalla v pechakh stanov goryachei prokatki [Measurement of metal temperature in furnaces of hot rolling mills], *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve: sbornik dokladov I Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (TIM'2012)* [Heat engineering and informatics in education, science and production: a collection of reports of the I All-Russian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists], Ekaterinburg, Russia, March 29–30, 2012. Ekaterinburg, Ural Federal University Publ., 2012, pp. 46–50. (In Russ.)

10. Denisov M. A., Chernykh V. N., *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2019, no. 1, pp. 73–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-1-73-78>

11. Temlyantsev M. V., Mikhailenko Yu. E., *Okislenie i obezугlerozhivanie stali v protsessakh nagreva pod obrabotku davleniem* [Oxidation and decarburization of steel in high-pressure heating processes]. Moscow, Teplotekhnika Publ., 2006, 200 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 14.12.2020; одобрена после рецензирования 24.05.2021; принята к публикации 31.05.2021.
The article was submitted 14.12.2020; approved after reviewing 24.05.2021; accepted for publication 31.05.2021.

Обнаружение и исследование аномалий магнитных полей над поверхностными дефектами сложнопрофильных деталей

Александра Валентиновна Чернова^{1✉}, Юрий Львович Николаев², Пётр Николаевич Шкатов³,
Михаил Юрьевич Прилепко⁴

^{1, 2, 3, 4} МИРЭА-Российский технологический университет, Москва, Россия

¹chernova_a@mirea.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7411-2345>

²nikolaev_ul@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9843-3557>

³petr_shkatov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2818-6236>

⁴prilepko@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1850-195X>

Аннотация. Рассмотрен эффективный способ обнаружения поверхностных дефектов по аномалиям магнитных полей, возникающих над трещинами, сколами и расщелинами угловых элементов сложнопрофильных деталей из ферромагнитных материалов. Способ основан на спектральном анализе сигнала тангенциально ориентированного виброиндукционного преобразователя. Теоретически обоснованы амплитудно-фазовый метод анализа и исследование на основе математического моделирования сигнала виброиндукционного преобразователя в виде тригонометрического ряда. Представлены результаты регистрации и анализа распределения напряжённости магнитного поля, а также амплитудно-фазового спектра сигнала виброиндукционного преобразователя вдоль поверхности с эвольвентным и резьбовым профилями. Результаты получены на контрольных образцах зубчатого колеса, резьбовой шпильки и болта с искусственными дефектами. Сформулированы условия выявляемости дефектов по результатам измерений амплитуды и фазы первых двух гармоник сигнала виброиндукционного преобразователя. Определены параметры схемы контроля эвольвентных профилей и резьб со значениями модуля и шага порядка нескольких миллиметров, обеспечивающие возможность автоматизации процесса контроля при удовлетворительном соотношении сигнал/фон. Предложенный способ предназначен для контроля сплошности деталей, содержащих профилированные участки поверхности (галтельные переходы, эвольвентные, резьбовые и шлицевые профили и т. п.).

Ключевые слова: магнитный контроль, аномалии магнитных полей, напряжённость магнитного поля, поверхностные дефекты, виброиндукционный преобразователь, преобразователь Холла

Финансирование: Работа выполнена при частичной финансовой поддержке со стороны системы мотивирующих выплат и оценки эффективности профессорско-преподавательского состава «МИРЭА-Российский технологический университет» (НИР № 41 ФТИ).

Для цитирования: Чернова А. В., Николаев Ю. Л., Шкатов П. Н., Прилепко М. Ю. Обнаружение и исследование аномалий магнитных полей над поверхностными дефектами сложнопрофильных деталей // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 46–52.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-46-52>

Detection and investigation of magnetic field anomalies over surface defects of complex-profile parts

Alexandra V. Chernova^{1✉}, Yuriy L. Nikolaev², Pyotr N. Shkatov³, Michail Y. Prilepko⁴

^{1, 2, 3, 4} MIREA-Russian Technological University, Moscow, Russia

¹chernova_a@mirea.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7411-2345>

²nikolaev_ul@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9843-3557>

³petr_shkatov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2818-6236>

⁴prilepko@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1850-195X>

Abstract. An effective method for detecting surface defects by magnetic field anomalies occurring over cracks, chips and crevices of angular elements of complex-profile parts made of ferromagnetic materials is considered. The method is based on the spectral analysis of the signal of a tangentially oriented vibration-induction transducer. The theoretical justification of the amplitude-phase method of analysis and research based on mathematical modeling of the signal of a vibration-inductive transducer in the form of a trigonometric series is given. The results of recording and analyzing the distribution of the magnetic field strength, as well as the amplitude-phase spectrum of the signal of a vibration-inductive transducer along a surface with an involute and threaded profiles are presented.

The results were obtained on control samples of a gear wheel, a threaded stud and a bolt with artificial defects. The conditions for detecting defects based on the results of measuring the amplitude and phase of the first two harmonics of the signal of a vibration-inductive transducer are formulated. The parameters of the control scheme of the involute profiles and threads with the values of the module and the step of the order of several millimeters, providing the possibility of automating the control process with a satisfactory signal/background ratio, are determined. The method is designed to control the continuity of parts containing profiled surface areas (galtel transitions, involute, threaded and spline profiles, etc.).

Keywords: magnetic flaw detection, magnetic field anomalies, magnetic field strength, surface defects, vibration-induction transducer, Hall transducer

Financial Support: The work was carried out with partial financial support from the system of motivating payments and evaluating the effectiveness of the teaching staff of MIREA – Russian Technological University (Research Work No. 41 FTI).

Введение. Для выявления дефектов типа трещин, возникающих в процессе эксплуатации на сложнопрофильных участках поверхностей деталей, применяют ультразвуковой, вихретоковый и магнитный методы неразрушающего контроля. Преимущество вихретокового и ультразвукового методов состоит в возможности дефектоскопии изделий из магнитных и немагнитных металлов. Достоверность ультразвукового и вихретокового контроля достигается при условии применения специализированных первичных преобразователей, рабочий торец которых геометрически соответствует профилю контролируемого участка [1, 2]. При изменении профиля контролируемого участка требуется замена преобразователя.

Принцип магнитной дефектоскопии основан на индикации или регистрации аномалий магнитных полей, возникающих над поверхностными и неглубоко расположенными подповерхностными дефектами деталей из ферромагнитных материалов, намагниченных приложенным магнитным полем [3].

К индикаторным относится магнитопорошковый метод, нашедший наибольшее применение в магнитной дефектоскопии [4]. Однако он требует тщательной подготовки поверхности и не даёт количественной оценки глубины выявленных дефектов. Кроме того, при контроле возможны ложные осаднения порошка в угловых элементах сложнопрофильных деталей.

Регистрация магнитных полей дефектов осуществляется различными магнитоизмерительными преобразователями с достаточным рабочим зазором [5–8]. На основании полученной измерительной информации можно оценить глубину выявляемых дефектов. Основной проблемой при таких измерениях является необходимость отстройки информативной составляющей сигнала первичного преобразователя от фоновых и шумовых полей для получения приемлемых отношений полезного и шумовых сигналов [9]. Перспективно применение новых магнитоизмерительных преобразователей с плёночными чувствительными элементами [10], позволяющими существенно повысить разрешающую способность контроля. Однако и данный тип магнитоизмерительных преобразователей не обеспечивает значимого повышения отношения сигнал/фон.

Для отстройки от шумовых и фоновых сигналов применяют различные методы, которые хорошо изучены для плоских поверхностей в связи с известным характером распределения напряжённости магнитного поля над дефектом, например [11–13]. Одним из известных способов является применение вибрационных режимов регистрации распределений

нормальной или тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля виброиндукционным преобразователем (ВИП) [14, 15].

При контроле сложнопрофильных деталей решение данной задачи затруднено следующими факторами:

труднодоступностью для преобразователя зон контроля вследствие соизмеримости их геометрических размеров;

значительной неравномерностью распределения фоновых полей криволинейных вогнутых и выпуклых поверхностей. Кроме неравномерности распределения имеют место локальные концентрации фоновых магнитных потоков в угловых элементах деталей. Такие фоновые потоки вызывают ложные сигналы и зашумление информативных полей от дефектов во впадинах резьб, зубчатых колёс и шлицевых элементов;

вынужденными при контроле угловыми и линейными смещениями преобразователя относительно контролируемой поверхности;

трудностью автоматизации процессов контроля.

По этим причинам актуальной задачей является разработка эффективных способов обнаружения поверхностных дефектов сложнопрофильных поверхностей по аномалиям магнитных полей над дефектными участками. Авторам представляется целесообразным использование для этих целей ориентированного на измерение тангенциальной составляющей ВИП, так как для подобных объектов имеется конструктивная возможность контроля в труднодоступных местах. Кроме того, расположение оси катушки ВИП параллельно сканируемой поверхности обеспечивает более узкую диаграмму направленности по сравнению с положением оси катушки по нормали.

Цель работы – исследование возможностей дефектоскопии эвольвентных профилей, а также резьб со значениями модуля и шага порядка нескольких миллиметров путём регистрации аномалий магнитных полей тангенциально ориентированным ВИП.

Описание метода. В настоящей работе в качестве объектов дефектоскопии выбраны:

зубчатое колесо диаметром делительной окружности 52 мм, число зубьев 13, модуль 4,0, с искусственным дефектом в виде параллельной боковой поверхности прорези во впадине профиля зуба глубиной 2 мм и шириной 0,25 мм;

резьбовая шпилька М20, шаг резьбы 2,5 мм, длина резьбы 80 мм с искусственными дефектами в виде прорези вдоль линии впадин и боковых граней на разных расстояниях от торца шпильки;

резьбовой болт М27, шаг резьбы 3 мм, длина резьбовой части 80 мм с дефектами в виде сколов и расщелин на выступах резьбы, расположенными на расстоянии 24 и 45 мм от схода резьбы.

Исследования проводили на экспериментальной установке, показанной на рис. 1. Установка содержит ВИП и установленную на двухкоординатном столе 1 систему намагничивания 3, контрольный образец 2 с искусственным дефектом. ВИП состоит из привода 6, маятникового стержня 5 длиной 60 мм и индуктивной катушки 4. В результате установки намагничивающей системы на координатном столе обеспечивается её перемещение (с помощью микрометрических винтов стола) в двух взаимно перпендикулярных направлениях x , y относительно привода ВИП. Цена деления отсчётного устройства 0,05 мм в диапазоне перемещений стола 0–75 мм.

Обмотка индуктивной катушки ВИП выполнена на каркасе диаметром 4 мм проводом диаметром 0,04–0,06 мм. Наружный диаметр катушки 4,5–4,8 мм.

В катушке ВИП при её виброперемещении по гармоническому закону в магнитном поле дефекта наводится периодическая ЭДС, пропорциональная мгновенной скорости изменения напряжённости магнитного поля:

$$e(t) = -k \frac{dH(x)}{dx} \frac{dx(t)}{dt} = -kG(x)a\omega \cos \omega t, \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от параметров катушки ВИП и магнитных свойств среды контроля; $H(x)$ – функция распределения усреднённой по сечениям катушки тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля

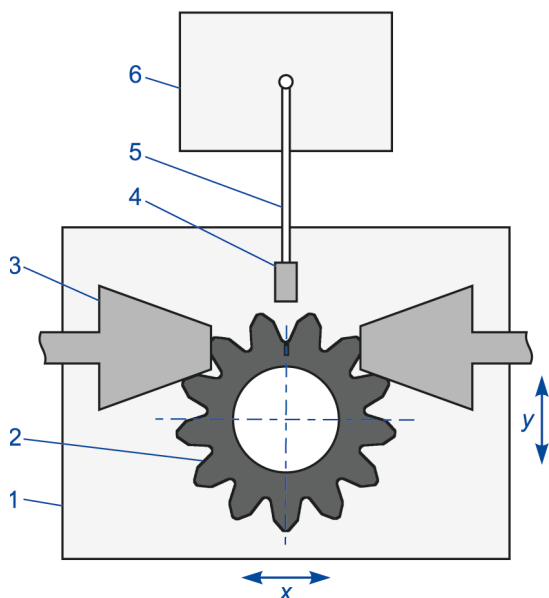


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 – двухкоординатный стол; 2 – контрольный образец с искусственным дефектом; 3 – система намагничивания; 4 – индуктивная катушка; 5 – маятниковый стержень; 6 – привод ВИП

Fig. 1. Experimental setup:

1 – two-coordinate table; 2 – reference sample with artificial defect; 3 – magnetization system; 4 – inductive coil; 5 – pendulum rod; 6 – VIT drive

дефекта вдоль оси координат x (ось координат x направлена параллельно контролируемой поверхности и имеет начало отсчёта в центре дефекта); $x(t) = x_0 + a \sin \omega t$ – закон виброперемещения катушки ВИП; x_0 – координата положения ВИП относительно центра дефекта; a , ω – амплитуда виброперемещения и частота колебаний соответственно; $G(x) = dH(x)/dx$ – функция распределения скорости изменения напряжённости поля по координате x .

Временные периодические сигналы ВИП и их спектр принято описывать с помощью модели полигармонического возбуждения [16]. Подобная модель позволяет выделить определённые частоты $n\omega$, кратные основной частоте возбуждения.

Как показывают эксперименты, выполненные на плоских образцах с искусственными дефектами в виде продольных прорезей, при амплитуде виброперемещения, не превышающей 2 мм, спектр выходного сигнала содержит в качестве значимых первые две гармоники. Это позволяет в окрестности точки $x = x_0$ представить распределение $G(x)$ в виде линейного двучлена:

$$G(x) = G(x_0) + G'(x_0)(x - x_0), \quad (2)$$

где $G'(x)$ – первая производная функции $G(x_0)$.

С учётом гармонического закона виброперемещения и формулы (2) преобразуем выражение (1) следующим образом:

$$e(t) = -kG(x_0)a\omega \cos \omega t - 0,5kG'(x_0)a^2\omega \sin 2\omega t, \quad (3)$$

Из (3) следует, что на участках аномально распределённых магнитных полей, аппроксимируемых прямой линией ($G(x_0) = \text{const}$, $G'(x_0) = 0$), выходным сигналом ВИП является гармоника основной частоты колебаний ω_0 , т. е. первая гармоника. На участках распределений, аппроксимируемых параболой ($G(x_0) = 0$, $G'(x_0) = \text{const}$), формируется гармоника удвоенной частоты. Амплитудные значения гармоник сигнала ВИП соответственно равны множителям при тригонометрических функциях в (3). При этом фаза гармоник зависит от знака коэффициентов пропорциональности аппроксимирующей прямой или параболы на соответствующих участках распределений.

Результаты экспериментальных исследований. При исследовании режимов контроля зубчатого колеса посредством ВИП предварительно определяли распределения тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля во впадине между зубьями с дефектом и без дефекта с помощью преобразователя Холла миллитесламетра ТПУ-01.

На рис. 2 показаны измерительные сечения I–VII, контуры детали и преобразователя Холла при разных значениях рабочего зазора.

Анализ измеренных распределений во впадине с дефектом и в бездефектной впадине зубчатого колеса показал, что в сечениях I–IV распределения имеют вид перевернутой параболы. Максимальный уровень напряжённости магнитного поля во впадине с трещиной примерно в два раза превышает максимальный уровень напряжённости в бездефектной впадине. Начиная с сечения II, кривизна распределений напряжённости магнитного поля над дефектом значительно превышает кривизну фоновых распределений. Таким образом, в измеряемых

сечениях II–V регистрировать поля дефектов можно как посредством ВИП по второй гармонике, так и тангенциально ориентированным преобразователем Холла по превышению выходного сигнала порогового уровня, отстраиваясь от фонового сигнала на бездефектной впадине. В то же время за границами тела зуба (измеряемые сечения VI–VII) отношение максимальных значений напряжённости магнитного поля в указанных сечениях отличается не более чем в два раза (рис. 3). Фоновое поле распределено практически равномерно с незначительной кривизной, а поле от дефекта имеет характерный для тангенциальных распределений вид, близкий к параболе, с достаточно большой кривизной. Из этого следует, что в сечениях VI–VII более эффективным будет применение ВИП. В этом случае из-за малой кривизны графика фоновых распределений амплитуда второй гармоники от фона должна быть небольшой. При этом представляется возможным регистрировать дефекты вне тела зубьев с достаточной чувствительностью за счёт выбора амплитуды и частоты колебаний катушки ВИП.

В таблице представлены результаты измерений (с погрешностью в пределах $\pm 10\%$) амплитуды A_2 второй гармоники выходного сигнала ВИП вдоль сечений VI–VII над впадиной зубчатого колеса с поверхностной трещиной (щелевой дефект глубиной 2 мм и шириной 0,25 мм) и над бездефектной впадиной в зависимости от амплитуды $A_{вп}$ виброперемещения при частоте колебаний катушки 210 Гц (SBR – signal-to-background ratio – отношение сигнал/фон). По сечению VI при амплитуде колебаний катушки 2 мм и более отношение сигнал/фон составляет порядка 12 дБ (4:1). Относительное постоянство этого отношения объясняется тем, что распределение напряжённости фонового поля вдоль сечения VI сохраняет вид параболы (см. рис. 3). В результате с увеличением амплитуды колебаний катушки ВИП возрастают как информативная, так и фоновая составляющие выходного сигнала. По сечению VII распределение напряжённости фонового поля практически равномерное при параболическом распределении напряжённости магнитного поля дефекта. В итоге фоновая составляющая сигнала ВИП практически постоянна и не превышает 0,6 мВ даже при увеличении амплитуды колебаний более 1 мм. При этом информативная составляющая прогрессивно возрастает. Соответственно возрастает отношение сигнал/фон с 6 до 16 дБ (от 2 до 6,1 раз).

Возможности дефектоскопии резьбовой шпильки исследовали на описанной выше установке пошаговым сканированием шпильки вдоль её образующей с зазором 1 мм между поверхностью шпильки и катушкой ВИП. Точки отсчёта амплитудных значений первой и второй гармоник сигнала ВИП выбирали над выступами и впадинами резьбы с шагом 1,25–2,5 мм. Частота колебаний катушки ВИП составляла 160 Гц при амплитуде колебаний 2 мм. Искусственные дефекты нанесены во впадинах резьбы в точках 22,5; 40; 57,5 мм с максимальной глубиной прорезей 2; 3; 4 мм соответственно и расположены перпендикулярно оси резьбы. В этом случае нарезка частично выходит на боковую грань профиля резьбы. С учётом ориентировочного расположения ВИП относительно нарезанной канавки оценка истинной глубины в месте съёма информации не представляется возможной.

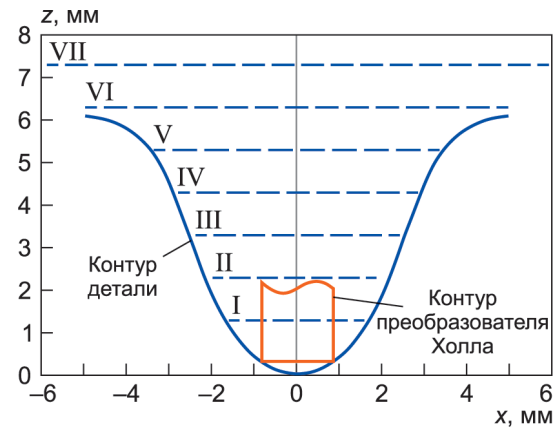


Рис. 2. Измерительные сечения I–VII впадины детали с размещённым в ней преобразователем Холла; значения глубины по оси z (1–7) – возможные значения рабочих зазоров преобразователя Холла по глубине впадины

Fig. 2. Measuring sections I–VII of the cavity of the part with the Hall transducer placed in it; depth values along the z axis (1–7) – possible values of the working gaps of the Hall transducer along the depth of the cavity

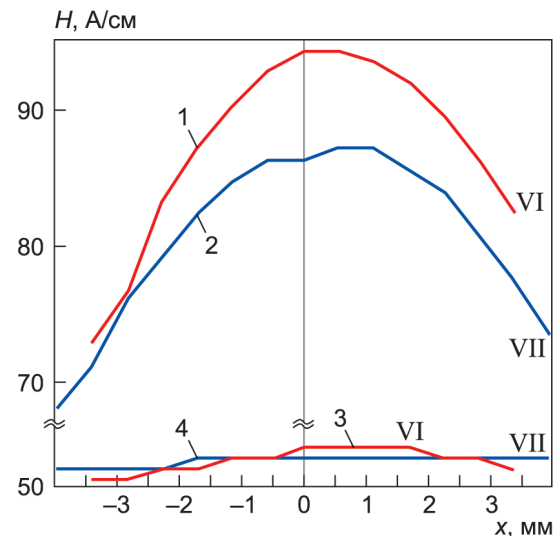


Рис. 3. Распределение напряжённости H магнитного поля над впадиной с дефектом (1, 2) и над бездефектной впадиной (3, 4) по сечениям VI–VII соответственно

Fig. 3. Distribution of the magnetic field strength H over the cavity with a defect (1, 2) and over the defect-free cavity (3, 4) in sections VI–VII

Амплитуда второй гармоники вдоль сечений VI, VII

Сечение	$A_{вп}$, мм	A_2 , мВ, над впадиной		SBR
		без дефекта	с дефектом	
VI	1,0	0,6	1,3	2,2
	2,0	1,1	4,4	4,0
	3,0	1,4	5,8	4,1
VII	1,0	0,4	0,8	2,0
	2,0	0,5	1,9	3,8
	3,0	0,6	3,7	6,1

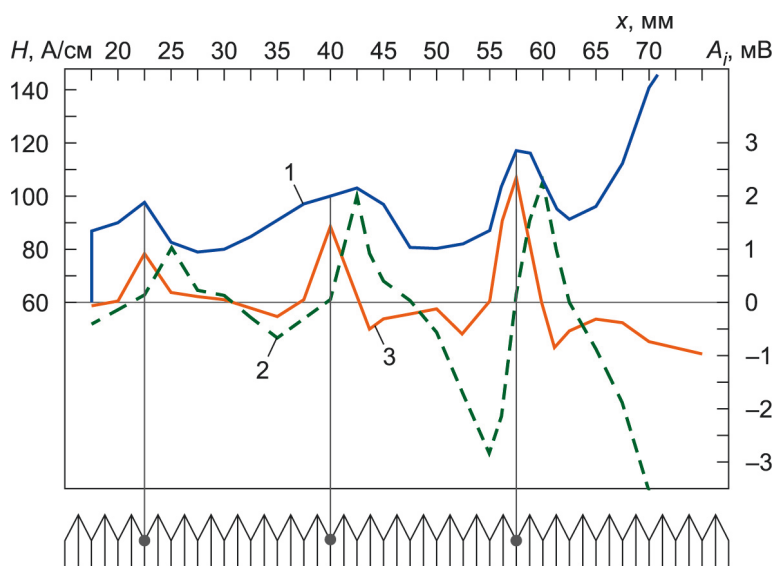


Рис. 4. Распределения напряжённости H магнитного поля (1), измеренной датчиком Холла, амплитуды A_1 первой (2) и второй (3) гармоник сигнала ВИП вдоль образующей шпильки над дефектными зонами

Fig. 4. Distributions of the magnetic field strength H (1) measured by the Hall transducer, the amplitudes A_1 of the first (2) and second (3) harmonics of the VIT signal along the generating pin over the defective zones

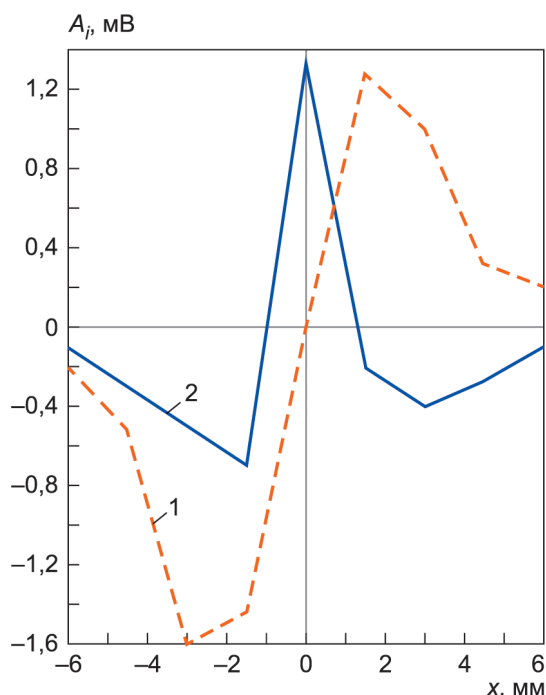


Рис. 5. Распределение амплитуды A_1 первой (1) и второй (2) гармоник над расщелиной глубиной 3 мм

Fig. 5. Amplitude distributions of the 1st harmonic (1) and the 2nd harmonic (2) over a cleft 3 mm deep

Предварительно в тех же точках с рабочим зазором 1 мм с помощью миллитесламетра были выполнены прямые измерения распределения напряжённости магнитного поля вдоль резьбовой шпильки на отрезке длины 10–70 мм, т. е. с отступом 10 мм от полюсов магнитной системы.

На рис. 4 показан график распределения напряжённости магнитного поля вдоль образующей шпильки (кривая 1). Неравномерность распределения обусловлена как дефектами, так и фоновым полем, ассиметрично распределённым вдоль образующей. Места расположения дефектов обозначены точками. Над центрами дефектов приращение напряжённости магнитного поля составляет 3–4 мТл относительно фонового поля. При этом соотношение сигнал/фон составляет менее единицы. Обнаружение дефектов с заранее неизвестной локализацией крайне затруднительно.

На рис. 4 также показаны графики распределения амплитуды первой (кривая 2) и второй (кривая 3) гармоник на контролируемом отрезке. В местах расположения дефектов амплитуда второй гармоники принимает наибольшее значение в диапазоне 0,8–2,3 мВ, а амплитуда первой гармоники обращается в ноль. При этом фаза первой гармоники изменяется на 180° . Такое сочетание амплитудных и фазовых значений гармоник служит главным диагностическим признаком дефекта. Кроме того, дополнительный признак – пиковые значения первой гармоники вблизи точки расположения дефекта, симметрично расположенные относительно точек расположения дефектов. Амплитуды первой гармоники имеют знак «+» на участках распределения с отрицательным тангенсом угла наклона распределения напряжённости поля и знак «–» на участках с положительным тангенсом угла наклона, т. е. при изменении фазы на 180° (рис. 5), что следует из основного уравнения (3) сигнала ВИП.

Значения амплитуды второй гармоники имеют знак «+» для выпуклых участков распределения напряжённости и «–» для вогнутых. При выявлении дефектов по признаку максимума второй гармоники соотношение сигнал/фон составляет более трёх.

Сравнительный анализ распределений (см. рис. 4) показывает более высокую локальность выявления дефектов с использованием ВИП. Например, распределение напряжённости магнитного поля над дефектом, измеренное преобразователем Холла в точке 40 мм, имеет более протяжённый характер, чем результаты измерения в этой точке амплитуды второй гармоники посредством ВИП.

Возможности регистрации расщелин и сколов на ребрах резьбы исследовали на контрольном образце болта. Для примера на рис. 5 представлен график распределения амплитуд первой и второй гармоник над первым сколом максимальной глубиной 3 мм.

Исследования проводили при амплитуде виброперемещения 1,5 мм на частоте 213 Гц. Распределение амплитудных значений гармоник носит типовой характер. Уровень фоновых гармоник на расстоянии 6 мм от расщелины не превышает 0,15 мВ, в то время как непосредственно над расщелиной вторая гармоника принимает значение по амплитуде 1,3 мВ. Над вторым дефектом в виде скола амплитуда фоновой гармоники не превышает 0,1 мВ при максимальном значении амплитуды второй гармоники над сколом 0,5 мВ. Распределения амплитудных значений гармоник

на рис. 5 аналогичны распределениям на рис. 4. Выявление дефекта выполняется по сформулированным выше диагностическим признакам.

Заключение. Проведённые эксперименты позволяют сделать вывод о возможности выявления дефектов сложнопрофильных поверхностей путём исследования аномалий магнитных полей над их поверхностными дефектами методом амплитудно-фазового анализа сигнала тангенциально ориентированного ВИП. Основные преимущества заключаются в высокой достоверности и локальности определения местоположения дефекта. При этом в отличие от ультразвуковых и вихретоковых преобразователей не требуется согласования профиля торца преобразователя с профилем контролируемой поверхности, что расширяет область применения однотипных ВИП.

При контроле зубчатых колёс и резьб, модуль и шаг которых составляет единицы миллиметров, возможно выполнение измерений с зазором 1–2 мм относительно диаметра окружности выступов колеса и наружного диаметра резьбы, что существенно упрощает процедуру контроля и создаёт предпосылки для её автоматизации.

Список источников

1. Шкатов П. Н., Цомук С. Р., Дамаскин А. Л., Куликов С. С. Прибор неразрушающего контроля для выявления дефектов типа «Усталостная трещина» в неразъемном резьбовом соединении легкосплавной буровой трубы ультразвуковым методом // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2009. № 5. С. 73–76.
2. Шкатов П. Н., Колосков Д. В. Разработка вихретокового преобразователя для дефектоскопии тепловых каналов роторов паровых турбин // *Приборы*. 2012. № 4. С. 14–18.
3. Бакунов А. С., Горкунов Э. С., Щербинин В. Е. Магнитный контроль. Учеб. пособие под общ. ред. В. В. Клюева. М.: Издательский дом «Спектр», 2011. 192 с.
4. Шелихов Г. С. Магнитопорошковый контроль изделий / Учеб. пособие / Под общ. ред. В. В. Клюева. М.: Издательский дом «Спектр», 2013. 176 с.
5. Реутов Ю. Я., Щербинин В. Е., Волков А. В. Возможности выбора преобразователей магнитного поля для дефектоскопии // *Дефектоскопия*. 2014. № 12. С. 71–85. <https://doi.org/10.1134/S1061830914120080>
6. Немцов М. В., Трифанов Г. Д. Индукционный датчик определения локальных дефектов в стальных канатах // *Измерительная техника*. 2018. № 2. С. 55–58. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-2-55-58>
7. Брякин И. В. Магнитодинамический магнитометр для задач дефектоскопии // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2013. № 3. С. 35–41.
8. Кузнецов П. А., Маннинен С. А., Жумагалиева А. А. Экспериментальная проверка расчётной модели намагниченного участка трубопровода с искусственными дефектами // *Измерительная техника*. 2017. № 6. С. 52–54.
9. Николаев Ю. Л., Ахметшина Э. Ф., Саморуков А. А., Чернова, А. В. Оценка соотношения информативного и фоновых сигналов при регистрации магнитных полей поверхностных

дефектов магнитоизмерительными преобразователями // *Измерительная техника*. 2020. № 5. С. 43–49.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-5-43-49>

10. Смирнов В. В., Алыкова О. М., Булатов М. Ф. Прикладные задачи по магнетизму // *Известия Российской Академии Наук. Серия физическая*. Т. 83. № 7, 2019. С. 981–983.

<https://doi.org/10.1134/S036767651907038X>

11. Shi Y., Zhang C., Li R., Cai M., Jia G., *Sensors*, 2015, vol. 15(12), pp. 31036–31055. <https://doi.org/10.3390/s151229845>

12. Azad A., Kim N., *Sensors (Basel)*, 2019, vol. 19(22), 4869. <https://doi.org/10.3390/s19224869>

13. Dehui W., Lingxin S., Xiaohong W., Zhitian L., *J. Nondestruct Eval*, 2017, vol. 36, 24. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0396-6>

14. Николаев Ю. Л., Шкатов П. Н., Чернова А. В., Саморуков А. А. Моделирование и гармонический анализ сигнала виброиндукционного преобразователя при его перемещении над намагниченным участком с поверхностной трещиной // *Приборы*. 2019. № 4. С. 17–25.

15. Николаев Ю. Л., Шкатов П. Н., Ахметшина Э. Ф., Саморуков А. А. Математическое описание и анализ сигнала виброиндукционного преобразователя при воздействии нормальной составляющей магнитных потоков рассеяния над дефектным участком // *Дефектоскопия*. 2021. № 7. С. 19–27. <https://doi.org/10.31857/S0130308221070034>

16. Кулагин В. П., Акимов Д. А., Павельев С. А., Гурьянова Е. О. Идентификация темпоральных аномалий спектрограмм сигналов виброизмерений ротора турбогенератора с применением рекуррентного нейросетевого автоэнкодера // *Российский технологический журнал*. 2021. Т. 9. № 2. С. 78–87. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-78-87>

References

1. Shkatov P. N., Comuk S. R., Damaskin A. L., Kulikov S. S., Pribor nerazrushajushhego kontrolja dlja vyjavlenija defektov tipa "Ustalostnaja treshhina" v nerazemnom rez'bovom soedinenii legkosplavnoj buril'noj truby ul'trazvukovym metodom, *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2009, no. 5, pp. 73–76. (In Russ.)
2. Shkatov P. N., Koloskov D. V., Razrabotka vihretokovogo preobrazovatelja dlja defektoskopii teplovyh kanavok rotorov parovyh turbin, *Instruments*, 2012, no. 4, pp. 14–18. (In Russ.)
3. Bakunov A. S., Gorkunov Je. S., Shherbinin V. E., *Magnitnyj kontrol' [Magnetic inspection]*, Moscow, Spektr Publ., 2011, 192 p. (In Russ.)
4. Shelihov G. S., *Magnitoporoshkovyj kontrol' izdelij [Magnetic powder control of products]*, Moscow, Spektr Publ., 2013, 176 p. (In Russ.)
5. Reutov Yu. Ya., Shcherbinin V. E., Volkov A. V., *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, no. 12, pp. 760–768. <https://doi.org/10.1134/S1061830914120080>
6. Nemtsov M. V., Trifanov G. D., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 2, pp. 166–171. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1404-7>
7. Brjakin I. V., Magnitodinamicheskij magnitometr dlja zadach defektoskopii, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 3, pp. 35–41. (In Russ.)

8. Kuznetsov P. A., Manninen S. A., Zhumagalieva A. A., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 600–603. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1242-z>
9. Nikolaev Y. L., Akhmetshina E. F., Samorukov A. A., Chernova A. V., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 5, pp. 375–382. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01798-w>
10. Smirnov V. V., Alykova O. M., Bulatov M. F., *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2019, vol. 83(7), pp. 895–897. <https://doi.org/10.3103/S1062873819070384>
11. Shi Y., Zhang C., Li R., Cai M., Jia G., *Sensors*, 2015, vol. 15(12), pp. 31036–31055. <https://doi.org/10.3390/s151229845>
12. Azad A., Kim N., *Sensors (Basel)*, 2019, vol. 19(22), 4869. <https://doi.org/10.3390/s19224869>
13. Dehui W., Lingxin S., Xiaohong W., Zhitian L., *J. Nondestruct Eval*, 2017, vol. 36, 24. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0396-6>
14. Nikolaev Ju. L., Shkatov P. N., Chernova A. V., Samorukov A. A. Modelirovanie i garmonicheskij analiz signala vibroindukcionnogo preobrazovatelja pri ego peremeshhenii nad namagnichennym uchastkom s poverhnostnoj treshhinoj, *Instruments*, 2019, no. 4, pp. 17–25. (In Russ.)
15. Nikolaev Ju. L., Shkatov P. N., Ahmetshina Je. F., Samorukov A. A., *Defektoskopiya*, 2021, no. 7, pp. 19–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0130308221070034>
16. Kulagin V. P., Akimov D. A., Pavelyev S. A., Guryanova E. O., *Russian Technological Journal*, 2021, vol. 9, no. 2, pp. 78–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-78-87>

Статья поступила в редакцию 15.07.2021; одобрена после рецензирования 28.07.2021; принята к публикации 04.08.2021.
The article was submitted 15.07.2021; approved after reviewing 28.07.2021; accepted for publication 04.08.2021.

Исследование текстурных признаков для задач распознавания клеток костного мозга в информационно-измерительных системах онкогематологии

Валентин Григорьевич Никитаев^{1✉}, Александр Николаевич Проничев², Николай Николаевич Тупицын³, Александра Дмитриевна Палладина⁴, Валентина Викторовна Дмитриева⁵, Александра Вячеславовна Козырева⁶, Михаил Сергеевич Майоров⁷, Михаил Андреевич Соломатин⁸, Екатерина Александровна Дружинина⁹, Евгений Валерьевич Поляков¹⁰, Булат Базаржапович Батуев¹¹

1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

3, 4 Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Блохина, Москва, Россия

¹vgnikitayev@mephi.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-4349-3023>

²anpronichev@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0443-8504>

³nntca@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-3966-128X>

⁴palladinaa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9400-7347>

⁵vvdmityriyeva@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9202-6691>

⁶kozyreva.sasha@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2727-3802>

⁷mayorov.mikhail.of@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3492-0414>

⁸mis4455@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9929-615X>

⁹kerry1995@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2474-2810>

¹⁰voterstreit@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5346-6504>

¹¹buligarmouth@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9322-2635>

Аннотация. Изучено влияние параметров построения матрицы пространственной смежности на текстурные признаки в задачах распознавания клеток костного мозга в информационно-измерительных системах диагностики острых лейкозов. Исследовано по 100 изображений бластных клеток В- и Т-клеточных острых лимфобластных лейкозов. Рассмотрено пять рассчитанных на основе матрицы пространственной смежности текстурных признаков – энергия, момент инерции, локальная однородность, максимальная вероятность, энтропия. При построении матрицы смежности проанализированы варьируемые параметры – тип цветового компонента RGB-модели цветного изображения, расстояние и направление смежности. Для заданной выборки изображений диапазон расстояний смежности, в котором наблюдается наибольшее изменение значений текстурных признаков, составил 1–11 пикселей. Значения признаков разных типов изменяются в диапазоне 20–1700 %. Максимальная информативность получена для G-компонента цветного изображения у текстурного признака «локальная однородность» (коэффициент информативности 0,48) с расстоянием смежности 1 пиксель. Для практического применения рекомендовано использовать четыре направления смежности при построении матриц пространственной смежности. Полученные результаты важны специалистам, работающим в области проектирования информационно-измерительных систем онкогематологии (диагностика опасных онкологических заболеваний – острых лейкозов).

Ключевые слова: распознавание образов, обработка изображений, текстурные признаки, матрица пространственной смежности, компьютерная микроскопия, диагностика острых лейкозов

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 18-29-09115.

Для цитирования: Никитаев В. Г., Проничев А. Н., Тупицын Н. Н., Палладина А. Д., Дмитриева В. В., Козырева А. В., Майоров М. С., Соломатин М. А., Дружинина Е. А., Поляков Е. В., Батуев Б. Б. Исследование текстурных признаков для задач распознавания клеток костного мозга в информационно-измерительных системах онкогематологии // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 53–59. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-53-59>

The study of texture features for the recognition problems of bone marrow cells in information-measuring systems of oncohematology

Valentin G. Nikitaev^{1✉}, Alexander N. Pronichev², Nikolay N. Tupitsin³, Aleksandra D. Palladina⁴, Valentina V. Dmitrieva⁵, Alexandra V. Kozyreva⁶, Mihail S. Mayorov⁷, Mihail A. Solomatin⁸, Ekaterina A. Druzhinina⁹, Evgeny V. Polyakov¹⁰, Bulat B. Batuev¹¹

1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

3, 4 N. N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russia

¹vgnikitayev@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4349-3023>

²anpronichev@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0443-8504>

³nntca@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-3966-128X>

⁴palladinaa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9400-7347>

⁵vvdmitriyeva@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9202-6691>

⁶kozyreva.sasha@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2727-3802>

⁷mayorov.mikhail.of@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3492-0414>

⁸mis4455@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9929-615X>

⁹kerry1995@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2474-2810>

¹⁰voterstreit@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5346-6504>

¹¹buligarmouth@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9322-2635>

Abstract. The influence of the parameters of the construction of the spatial-dependence matrices on textural features in the tasks of recognizing bone marrow cells in information and measurement systems for the diagnosis of acute leukemia is studied. Bone marrow preparations were obtained from patients with B- and T-cell acute lymphoblastic leukemias. 100 images of blast cells of B- and T-types were involved. Five textural features are considered – energy, inertia moment, local uniformity, maximum probability, entropy. The features were calculated on the basis of the spatial dependence matrices. The type of the color components of the RGB color image model, the adjacency distance and the direction of adjacency were analyzed as variable parameters when constructing the specified matrices. For a given sample of images of blast cells of type T and B a range of adjacency distances from 1 to 11 pixels was revealed, in which the greatest change in the values of texture features is observed. For different types of signs the change ranged from 20 % to 1700 %. The maximum information content among the studied texture features was obtained for the G-component of a color image in the texture feature “local uniformity” (information content coefficient 0.48) with an adjacency distance equal to one pixel. For practical application, it is recommended to use four directions of adjacency when constructing spatial adjacency matrices. The obtained results are important for specialists working in the field of designing information and measurement systems of oncohematology (diagnostics of dangerous oncological diseases – acute leukemias).

Keywords: pattern recognition, image processing, textural features, spatial-dependence matrices, computer microscopy, acute leukemia diagnosis

Financial Support: the work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) under project no. 18-29-09115.

Введение. В диагностике онкологических заболеваний системы крови важную роль играет визуальный микроскопический анализ мазков крови и препаратов костного мозга. В ходе анализа определяется процентный состав ядерных клеток различных типов (формула крови – при анализе периферической крови, миелограмма – для костного мозга). В случае острых лейкозов субстрат опухоли представляет бластные клетки (незрелые клетки костного мозга). Существует несколько разновидностей острого лейкоза, каждому из них соответствуют бластные клетки разных типов. В частности, для диагностики острого лимфобластного лейкоза необходимо определять линейность бластных клеток В- и Т-клеточных острых лимфобластных лейкозов. Одними из ключевых критериев в выявлении бластных клеток во время визуального микроскопического анализа являются характеристики структуры хроматина ядер клеток. При вербальном (словесном) описании изображений клеток врачи в качестве существенного отличительного признака бластных клеток отмечают нежносетчатую или мелкосетчатую структуру хроматина ядер клеток [1]. Визуальный микроскопический анализ трудоёмок, требует большого напряжения зрения, что порождает ошибки классификации клеток и, как следствие, может приводить к ошибкам диагностики острого лейкоза.

Поэтому необходимо автоматизировать визуальный микроскопический анализ.

Системы обработки изображений широко применяются в медико-биологических исследованиях различных объектов [2]. При решении задачи автоматической классификации изображений клеток крови применяются методы распознавания [3–6]. Классическая структура системы распознавания включает предобработку, описание, классификацию, причём ключевым является описание [7]. При проектировании систем распознавания для описания объектов на цифровых 2D-изображениях (в рассматриваемом случае – клеток костного мозга) применяются различные признаки. Все они основаны на яркости и цвете пикселей (непроизводных элементов цифрового изображения). Широко распространены такие признаки классификации объектов, как характеристики формы, размеров, цвета, контраста, текстуры [8, 9].

При проектировании информационно-измерительных систем диагностики острых лейкозов в описании изображений структуры хроматина ядер клеток целесообразно применять текстурный анализ. Здесь под текстурой понимается пространственно-яркостная организация элементов изображения. Текстура содержит информацию о пространственном распределении тональных вариаций пикселей,

для её описания в [10] предложено использовать ряд текстурных признаков – расчётных характеристик на основе матриц пространственной смежности (МПС) (или матриц совместной встречаемости, или матриц Харалика).

Для распознавания клеток крови и костного мозга в качестве признаков классификации успешно используются некоторые текстурные признаки [11]. Но для клеток разных типов, имеющих сходный внешний вид на микроскопических изображениях, например для бластных клеток В- и Т-типов, результаты автоматической классификации недостаточно точны [12, 13]. Поэтому актуален поиск информативных признаков для повышения точности классификации.

В научной литературе мало внимания уделяется анализу влияния выбора параметров построения МПС (расстояний и направлений смежности) на значения текстурных признаков бластных клеток В- и Т-типов. Обычно применяются МПС для единичного расстояния смежности, а в качестве направлений смежности рассматриваются совместно вертикальные и горизонтальные направления. Не изучено влияние выбора параметров построения МПС на информативность текстурных признаков. Знание этих факторов важно при проектировании информационно-измерительных систем диагностики острых лейкозов.

Цель работы – исследование влияния параметров построения МПС (типа цветовой компоненты цветного изображения, расстояния и направлений смежности) на информативность текстурных признаков при решении задач распознавания бластных клеток В- и Т-типов в информационно-измерительных системах диагностики острых лейкозов.

Материалы и методы. Объектами экспериментального исследования выступали изображения искусственных (изображение чёрно-белых полос (рис. 1, поз. 1) с шириной черной полосы 5 пикселей и белой полосы 15 пикселей) и естественных текстур (изображения ядер бластных клеток Т- и В-типов (рис. 1, соответственно поз. 2, 3)).

Для получения изображений клеток использовали препараты костного мозга, полученные от пациентов с В- и Т-клеточным острым лимфобластным лейкозом. Препараты костного мозга для компьютерной микроскопии были приготовлены в Лаборатории иммунологии гемопоэза Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н. Н. Блохина. Цифровые изображения получены с помощью цифровой камеры Implex IPX-4M15T-GCFB (Implex, США) и биологического светового микроскопа Olympus BX-41 (Olympus, Япония). Цифровые микроскопические изображения клеток на препаратах костного мозга на предметном стекле снимали с применением объектива с масляной иммерсией и кратностью увеличения 100 $\times$. Формат цифрового изображения 2048 $\times$ 2048 пикселей. Цветовое кодирование выполнялось в RGB (R – красный, G – зелёный, B – синий) цветовой модели, глубина кодирования в каждом из цветовых компонентов – 8 бит.

Информативность текстурных признаков оценивали по выборке цветных цифровых микроскопических изображений ядер бластных клеток Т- и В-типов (по 100 изображений клеток каждого типа). Цифровые изображения обрабатывались

специально разработанной на языке C++ компьютерной программой, в которой отдельно для каждого цветового RGB-компонента с разными значениями расстояния и направлений смежности реализован алгоритм расчёта следующих текстурных признаков – энергии *ASM*, локальной однородности *LUN*, энтропии *ENT*, момента инерции *CON*, максимальной вероятности *MPR*:

$$ASM(d, v) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} [P(i, j, d, v)]^2;$$

$$LUN(d, v) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{[P(i, j, d, v)]}{1 + (i - j)^2},$$

$$ENT(d, v) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P(i, j, d, v) \ln[P(i, j, d, v)];$$

$$CON(d, v) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (i - j)^2 P(i, j, d, v);$$

$$MPR(d, v) = \max[P(i, j, d, v)],$$

где $P(i, j, d, v)$ – нормализованная матрица пространственной смежности (индексы i, j элементов матрицы, расстояние d смежности и номер v варианта набора принимают при расчёте направлений смежности); N – число возможных градаций яркости цифрового изображения (для кодированного 8 битами изображения число возможных градаций яркости составляет 256).

Расстояние смежности d – минимальное число шагов, которые необходимо сделать, для того чтобы перейти от первого пиксела в паре смежных пикселей ко второму. Под шагом понимается переход от рассматриваемого пиксела к пикселу, соприкасающемуся с ним по грани либо в одной из вершин квадрата, представляющего пиксел цифрового изображения. Для соприкасающихся пикселей $d=1$.

Возможны разные варианты направлений смежности, в настоящей работе рассматривается три: один смежный пиксел по направлению справа; четыре смежных пиксела по направлениям слева, справа, сверху и снизу (совместно по горизонтали и вертикали); восемь смежных пикселей

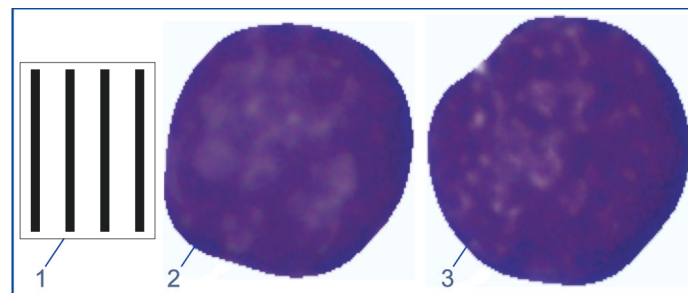


Рис. 1. Пример изображений искусственной текстуры 1 и естественных текстур – ядер бластных клеток Т- и В-типов (соответственно 2, 3)

Fig. 1. An example of artificial (1) and natural textures images (blast cells nuclei of T- and B-type – 2 and 3)

по горизонтали, вертикали и двум диагоналям квадратной окрестности пиксела.

Нормализованная матрица $P(i, j, d, v)$ получается из МПС $H(i, j, d, v)$:

$$P(i, j, d, v) = H(i, j, d, v) \left[\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} H(i, j, d, v) \right]^{-1}.$$

Нормализация необходима, чтобы текстурные признаки не зависели от размера области исследуемой текстуры.

Элемент МПС $H(i, j, d, v)$ показывает, сколько в изображении имеется пар пикселей, у которых яркости первого и второго пиксела пары равны i, j соответственно, при этом пиксели находятся на расстоянии смежности d , а направления смежности представлены набором вариантов под номером v .

С точки зрения точности классификации клеток по типам важно не абсолютное значение текстурной характеристики клетки, а в какой степени это значение для клеток одного типа отличается от его значения для клеток другого типа. Для оценки такого различия в настоящей работе использовали коэффициент информативности текстурного признака:

$$K = |M_1 - M_2| [1,6(S_1 + S_2)]^{-1},$$

где M_1, M_2 – средние значения текстурного признака для изображений клеток первого и второго типов соответственно; S_1, S_2 – средние квадратические отклонения (СКО) текстурных характеристик клеток двух типов.

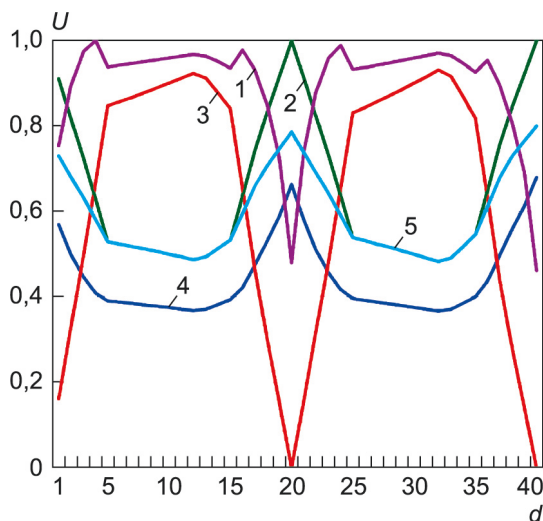


Рис. 2. Зависимости нормализованных значений U текстурных характеристик с направлением смежности «справа» для R-компоненты цифрового изображения с искусственной текстурой от расстояния смежности d :

1 – энтропия; 2 – локальная однородность; 3 – максимальная вероятность; 4 – момент инерции; 5 – энергия

Fig. 2. The normalized value of the texture characteristics dependences U with the "right" adjacency direction for the red component of a digital image with artificial texture on the adjacency distance d :

1 – entropy; 2 – local homogeneity; 3 – maximum probability; 4 – moment of inertia; 5 – energy

Целесообразность применения такого показателя информативности обусловлена опытом кафедры компьютерных медицинских систем Национального исследовательского ядерного университета МИФИ и Лаборатории иммунологии гемопоэза Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н. Н. Блохина при решении практических задач автоматизации диагностики острых лейкозов.

Экспериментальные исследования. Цель эксперимента – практическое исследование текстурных признаков на изображениях с искусственной и естественной текстурами. Целесообразность выбора искусственной текстуры с однотипными структурными элементами простой формы (однотонные линии на однотонном фоне) объясняется необходимостью выявить зависимость текстурных признаков от соотношения размеров структурных элементов изображения и параметра (расстояния смежности), использованного при построении МПС.

Методика проведения эксперимента состоит из трёх этапов: формирование выборки изображений для программной обработки; компьютерная обработка изображений; анализ результатов компьютерной обработки с практическими рекомендациями по выбору признаков для системы классификации В- и Т-бластных клеток костного мозга при диагностике острых лейкозов.

Формирование выборки изображений для программной обработки зависит от типа текстуры – естественной или искусственной. Для искусственной текстуры выборка изображений представлена изображением вертикальных черно-белых полос (см. рис. 1, поз. 1). Для естественных текстур выборка включает по 100 изображений ядер Т-бластных и В-бластных клеток (см. рис. 1, поз. 2, 3 соответственно). Перед вычислением МПС выполняется предварительная обработка микроскопических изображений препаратов костного мозга с целью выделения ядра клетки, чтобы обеспечить вычисление МПС только для внутренней области ядра.

Компьютерная обработка изображения из подготовленной выборки выполняется по следующему алгоритму. В программе для каждого цифрового цветного изображения формируется три полутоновых изображения (в градациях серого) для RGB цветовых компонентов. Для каждого изображения компоненты формируется МПС с разными расстояниями и направлениями смежности (по трём вариантам направлений смежности). Затем по приведённым выше формулам рассчитываются текстурные признаки.

Анализ результатов компьютерной обработки зависит от типа исследуемых текстур. Для изображения искусственной текстуры строится график зависимости пяти исследуемых текстурных признаков (энергии, энтропии, локальной однородности, максимальной вероятности, момента инерции) от расстояния смежности в диапазоне 1–40 пикселей для R-компонента изображения и одного направления смежности (справа). Другие направления смежности здесь не рассматриваются, так как в них не изменяются яркость и текстурные признаки (с изменением расстояния смежности). Поскольку изображение чёрно-белое, то для G- и B-компонентов результаты анализа такие же, как для R-компонента. По графикам оценивается область изменений признаков в зависимости

от расстояния смежности и соотносится с периодом структурных элементов и их размером на изображении искусственной текстуры.

Для изображений естественных текстур отдельно в каждой из выборок по 100 изображений бластных клеток В- и Т-типов рассчитываются средние значения и СКО текстурных признаков. Строятся графики зависимости средних значений исследуемых пяти текстурных признаков от расстояния смежности в диапазоне 1–40 пикселей для RGB-компонентов изображений и трёх вариантов направлений смежности. На основе средних значений и СКО текстурных признаков определяется коэффициент информативности и строятся графики зависимости коэффициента информативности текстурных признаков от расстояния смежности для каждой из цветовой RGB-компонентов и трёх вариантов направлений смежности. Анализируется влияние параметров МПС (типа цветовой компоненты, расстояния и направлений смежности) на информативность текстурных признаков при распознавании бластных клеток В- и Т-типов в информационно-измерительных системах диагностики острых лейкозов. Определяются следующие показатели текстурного анализа: наибольшая информативность текстурных признаков в задаче разделения бластных клеток на В- и Т-типы; цветовой компонент, при котором информативность текстурных признаков наибольшая. Затем оцениваются локальные максимумы информативности текстурных признаков.

По полученным данным можно выбирать признаки классификации в информационно-измерительных системах диагностики острых лейкозов.

Анализ результатов. На рис. 2 представлен график зависимости текстурных характеристик (нормализованного значения U) изображения с искусственной текстурой с направлением смежности «справа» для R-компонента от расстояния смежности d . Для изображения с искусственной текстурой при расстояниях смежности, кратных 20 пикселям, на графиках наблюдаются локальные экстремумы, что указывает на периодичность расположения структурных элементов искусственной текстуры. Резкое изменение значений признаков в диапазонах расстояний смежности 1–5, 15–20, 21–25 и т. д. отражает характерный размер текстурного элемента изображения – ширину черной линии 5 пикселей.

Для естественных текстур, соответствующих реальным изображениям ядер бластных клеток Т- и В-типов, при изменении расстояния смежности в начале графика $U(d)$ наблюдается резкое изменение признака, затем изменения становятся меньше, но нет локальных экстремумов, т. е. отсутствуют периодически расположенные структурные элементы (рис. 3). Следует отметить, что значения текстурных признаков для клеток Т- и В-типов различны, но в масштабе рис. 3 соответствующие линии сливаются (за исключением 4, 5 для признака «момент инерции»). Самое резкое изменение признаков отмечается в диапазоне расстояний смежности 1–11 пикселей. Для признаков разных типов изменение составило 20–1700 %. Перелом в тенденции зависимости $U(d)$ наблюдается в области $d=5\dots 11$ пикселей. Следовательно, можно считать, что статистически значимый

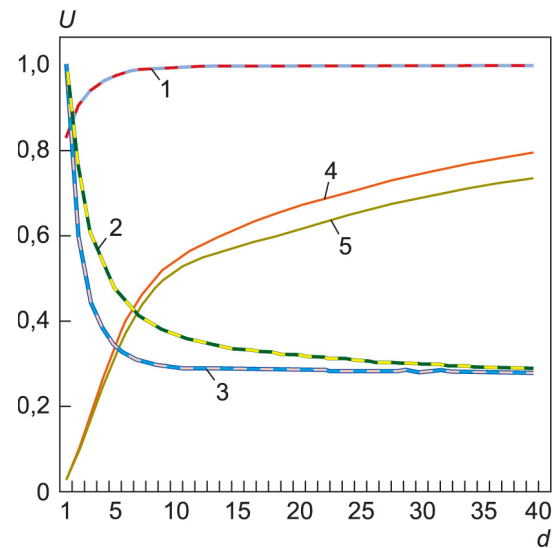


Рис. 3. Зависимости нормализованных средних значений текстурных характеристик от расстояния смежности при четырёх направлениях смежности для R-компоненты изображений с естественной текстурой – ядер бластных клеток Т- и В-типов для текстурных признаков: 1 – энтропия; 2 – локальная однородность; 3 – максимальная вероятность и энергия; 4, 5 – момент инерции для Т- и В-типов клеток соответственно

Fig. 3. The dependences of normalized average values of texture characteristics on the adjacency distance at four adjacency directions for the red component of images with a natural texture – the nuclei of blast cells of T- and B-types for indicate textural features: 1 – entropy; 2 – local uniformity; 3 – maximum probability and energy; 4, 5 – moment of inertia for T- and B-cell types

характерный пространственный размер текстурных элементов на изображении структуры хроматина ядер бластных клеток В- и Т-типов не превышает 11 пикселей.

Анализ коэффициентов информативности текстурных признаков для RGB цветовой компоненты цифровых изображений ядер бластных клеток показал, что для каждого компонента среди всех рассмотренных текстурных признаков максимальное значение имеет локальная однородность, при этом для G-компонента максимум достигается при четырёх направлениях смежности и $d=1$ пиксел ($K=0,48$), для В-компонента – при восьми направлениях смежности и $d=1$ пиксел ($K=0,47$), для R-компоненты – для четырёх направлений смежности и $d=11$ пикселей ($K=0,43$). На рис. 4 представлена зависимость коэффициента информативности текстурного признака «локальная однородность» от расстояния смежности для трёх цветовой компонент и трёх направлений смежности.

Анализ влияния на текстурные признаки выбора типа направлений смежности показывает, что для R- и G-компонентов максимальные значения коэффициента информативности достигаются при расчёте МПС для четырёх направлений смежности. Для В-компонента максимальный коэффициент информативности наблюдается для восьми направлений смежности, превышая этот показатель для четырёх направлений смежности на 1,3 %, а для одного направления смежности на 11 %. Если рассматривать отдельно произвольный текстурный признак,

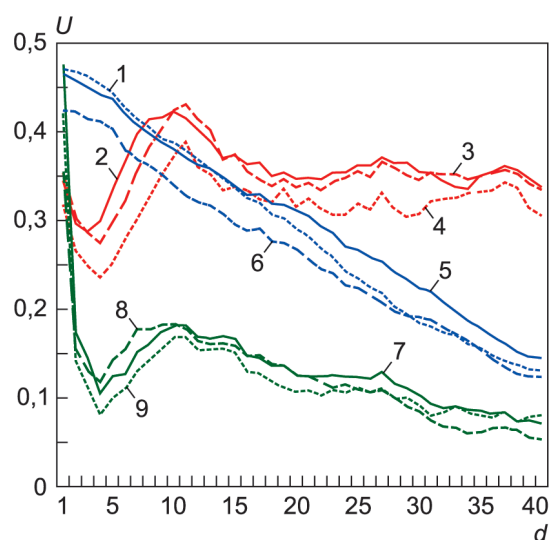


Рис. 4. Зависимость коэффициента K информативности текстурного признака «локальная однородность» от расстояния смежности d для RGB цветовых компонентов и разного количества направлений смежности – одного (4, 6, 9), четырёх (3, 5, 7) и восьми (1, 2, 8)

Fig. 4. The dependence of the coefficient K of the information content of the texture feature "local uniformity" on the adjacency distance d for RGB color components and a different number of adjacency directions – one (4, 6, 9), four (3, 5, 7) and eight (1, 2, 8)

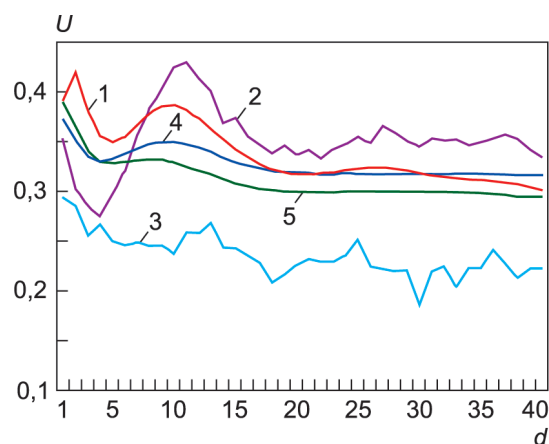


Рис. 5. Зависимость коэффициента K информативности текстурных признаков для R-компонента при четырёх направлениях смежности: 1–5 – те же, что на рис. 2

Fig. 5. The dependence of the coefficient K of the information content of texture features for the R-component with four directions of adjacency: 1–5 – the same as in fig. 2

то его коэффициенты информативности для разных направлений смежности изменяются аналогично в зависимости от расстояния смежности. При этом коэффициент информативности для одного направления смежности как правило меньше аналогичных показателей для четырёх и восьми направлений. Учитывая незначительные различия коэффициентов информативности при восьми и четырёх направлениях смежности, а также меньшие вычислительные затраты при четырёх направлениях смежности можно рекомендовать при расчёте МПС использовать четыре направления смежности.

Коэффициент информативности текстурного признака «локальная однородность» для R-компонента (см. рис. 4) достигает абсолютного максимума при $d=11$ пикселей для четырёх направлений смежности. Для G-компонента этого же текстурного признака абсолютный максимум достигается при $d=1$ пиксел, а при $d=11$ пикселей наблюдается локальный максимум. На рис. 5 представлена зависимость коэффициента информативности текстурных признаков для R-компонента при четырёх направлениях смежности. Для $d=1..7$ пикселей максимальным будет коэффициент информативности текстурного признака «момент инерции» ($K=0,35-0,43$). Следует отметить, что для текстурных признаков «момент инерции», «энергия», «энтропия» наблюдаются локальные максимумы для расстояний смежности 10, 10 и 8 пикселей соответственно.

Анализ графиков на рис. 4, 5 свидетельствует о том, что пространственные взаимоотношения элементов изображений ядер бластных клеток на расстояниях 8–11 пикселей значимы для разделения клеток на В- и Т-типы. Этот вывод коррелируется и с итогом анализа зависимостей на рис. 2 – характерный средний размер текстурного элемента на изображениях бластных клеток не превышает 11 пикселей.

Анализ зависимости исследованных текстурных характеристик изображений структуры хроматина бластных клеток В- и Т-типов от расстояния смежности выявил следующие особенности:

наибольшая информативность среди исследованных текстурных признаков в задачах распознавания бластных клеток В- и Т-типов в препаратах костного мозга наблюдается для признака «локальная однородность» для G-компонента цветного изображения ($K=0,48$);

большинство текстурных признаков цифрового изображения с одинаковыми расстояниями смежности более информативно для R-компонента по сравнению с G- и В-компонентами (исключение составляет признак «локальная однородность», более информативный для указанных компонент при $d=1$ пиксел и $d=1..8$ пикселей соответственно);

коэффициенты информативности большинства рассматриваемых текстурных признаков имеют тенденцию уменьшения с увеличением расстояния смежности (при наличии локальных максимумов). Исключение составляют два случая. Первый – коэффициент информативности признака локальной однородности R-компонента сначала уменьшается, потом увеличивается, достигая абсолютного максимума при расстоянии смежности 11 пикселей ($K=0,43$). Второй случай – для всех текстурных характеристик В-компонента, за исключением локальной однородности, вначале наблюдается увеличение с достижением абсолютного максимума при расстоянии смежности в диапазоне 6–11 пикселей ($K=0,2-0,3$).

Результаты анализа влияния параметров МПС (расстояния и направлений смежности) на информативность текстурных признаков могут служить основой для формирования оптимального набора текстурных признаков при разработке моделей распознавания бластных клеток В- и Т-типов в информационно-измерительных системах диагностики острых лейкозов.

Заключение. По результатам проведенных исследований выявлено, что информативность признаков существенно зависит от расстояния смежности и достигает максимума при разных расстояниях смежности для разных цветовых компонент. Локальные максимумы в зависимости информативности признаков от расстояния смежности связаны с характерными размерами текстурных элементов исследуемых объектов. Характерный средний размер текстурных элементов на цифровых микроскопических изображениях ядер бластных клеток костного мозга В- и Т-типов составляет 11 пикселей. Цветовые компоненты R, G, B по-разному влияют на информативность признаков, и каждый цветовой компонент вносит отдельный вклад в решение задачи распознавания объектов на цветных изображениях.

Полученные в работе результаты могут быть полезны при проектировании современных и перспективных информационно-измерительных систем онкогематологии.

Список источников

1. Гематология: руководство для врачей / Под ред. Н. Н. Мамаева. СПб.: СпецЛит, 2019. 639 с.
2. Самородов А. В. Биотехнические системы автоматизированной микроскопии цитологических препаратов // Медицинская техника. 2018. № 6. С. 17–19.
3. Sahlol A. T., Kollmannsberger P., Ewees A. A., *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59215-9>
4. Kutlu H., Avci E., Ozyurt F., *Medical hypotheses*, 2020, vol. 135, 109472. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2019.109472>
5. Черных Е. М., Михеев В. М. Компьютерная система классификации лейкоцитов на изображениях клеток крови // Научный результат. Информационные технологии. 2019. Т. 4. № 3. С. 38–47.
6. Amin M., Kermani S., Talebi A., Oghli M., Recognition of acute lymphoblastic leukemia cells in microscopic images using k-means clustering and support vector machine classifier, *Journal of Medical Signals & Sensors*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 49–58.
7. Никитаев В. Г. Высокотехнологичные информационно-измерительные комплексы онкологической диагностики: проблемы и ключевые положения методологии построения // Измерительная техника. 2015. № 2. С. 68–70.
8. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. Кн. 2. 480 с.
9. Пантелеев В. Г., Слаев В. А., Чуновкина А. Г. Метрологическое обеспечение анализаторов изображений. // Измерительная техника. 2008. № 1. С. 67–71.
10. Haralick R. M., *Proceedings of the IEEE*, 1979, vol. 67, no. 5, pp. 786–804. <https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11328>
11. Дмитриева В. В., Тулицын Н. Н., Поляков Е. В., Самсонова А. Д. Исследование эффективности классификации изображений клеток костного мозга в компьютерных системах диагностики острых лейкозов и минимальной остаточной

болезни // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. № 3. С. 1–9.

12. Никитаев В. Г., Тулицын Н. Н., Проничев А. Н., Поляков Е. В., Дмитриева В. В., Чернышева О. А., Серебрякова И. Н., Палладина А. Д. Технологии искусственного интеллекта в диагностике острых лимфобластных лейкозов и минимальной остаточной болезни // Медицинская техника. 2020. № 5. С. 42–44.

13. Nikitaev V. G., Pronichev A. N., Polyakov E. V., Chernysheva O. A., Serebryakova I. N., Tupitsyn N. N., *Procedia Computer Science*, 2020, vol. 169, pp. 353–358. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.229>

References

1. *Gematologiya: rukovodstvo dlia vrachei*, ed. N. N. Mamaev, St. Petersburg, SpetsLit. Publ., 2019, 639 p. (In Russ.)
2. Samorodov A. V., *Biomedical Engineering*, 2019, vol. 52, no. 6, pp. 387–390. <https://doi.org/10.1007/s10527-019-09853-9>
3. Sahlol A. T., Kollmannsberger P., Ewees A. A., *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59215-9>
4. Kutlu H., Avci E., Ozyurt F., *Medical hypotheses*, 2020, vol. 135, 109472. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2019.109472>
5. Chernykh E. M., Mihelev V. M., Komp'yuternaya sistema klassifikatsii leykocitov na izobrazheniyah kletok krovi, *Nauchnyy rezultat. Informatsionnye tekhnologii*, 2019, vol. 4, no. 3, pp. 38–47. (In Russ.)
6. Amin M., Kermani S., Talebi A., Oghli M., Recognition of acute lymphoblastic leukemia cells in microscopic images using k-means clustering and support vector machine classifier, *Journal of Medical Signals & Sensors*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 49–58.
7. Nikitaev V. G., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 214–218. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0688-0>
8. Pratt W., *Digital image processing: book 2*, Hoboken, Wiley, 1982, 480 p.
9. Panteleev V. G., Slaev V. A., Chunovkina A. G., *Measurement Techniques*, 2008, vol. 51, no. 1, pp. 107–112. <https://doi.org/10.1007/s11018-008-0019-9>
10. Haralick R. M., *Proceedings of the IEEE*, 1979, vol. 67, no. 5, pp. 786–804. <https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11328>
11. Dmitriyeva V. V., Tupitsyn N. N., Polyakov Ye. V., Samsonova A. D., Issledovaniye effektivnosti klassifikatsii izobrazheniy kletok kostnogo mozga v komp'yuternykh sistemakh diagnostiki ostrykh leykozov i minimal'noy ostatochnoy bolezni, *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii*, 2020, vol. 8, no. 3, pp. 1–9. (In Russ.)
12. Nikitaev V. G., Tupitsyn N. N., Pronichev A. N., Serebryakova I. N., Palladina A. D., *Biomedical Engineering*, 2021, vol. 54, no. 5, pp. 354–356. <https://doi.org/10.1007/s10527-021-10038-6>
13. Nikitaev V. G., Pronichev A. N., Polyakov E. V., Chernysheva O. A., Serebryakova I. N., Tupitsyn N. N., *Procedia Computer Science*, 2020, vol. 169, pp. 353–358. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.229>

Статья поступила в редакцию 25.08.2021; одобрена после рецензирования 15.09.2021; принята к публикации 22.09.2021.
The article was submitted 25.08.2021; approved after reviewing 15.09.2021; accepted for publication 22.09.2021.

Научная статья

УДК 57.087

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-60-64>

Цветовая мера для калибровки систем цифровой микроскопии

Денис Сергеевич Махов^{1✉}, Гайк Рафаэлович Сагателян², Андрей Владимирович Самородов³

^{1, 2, 3} Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

¹dennismak@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3794-186X>

²h_sagatelelyan@bmstu.ru

³avs@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3301-2561>

Аннотация. Изучена проблема стандартизации изображений, получаемых при микроскопических исследованиях с использованием систем цифровой микроскопии. Актуальность обеспечения воспроизводимости цвета на изображениях, получаемых различными системами цифровой микроскопии, обусловлена тем, что искажение цветов может приводить к терапевтическим ошибкам при интерпретации полученной информации. При различной аппаратной реализации систем цифровой микроскопии данная воспроизводимость может быть обеспечена цветовой калибровкой с использованием специальной меры. На основании анализа литературных источников сформулированы требования к разработке цветовой меры. Разработан и изготовлен прототип цветовой меры, состоящий из 97 полей цветного стекла. Координаты цвета и координаты цветности в пространстве CIE XYZ прототипа цветовой меры рассчитаны из экспериментально определённых спектральных распределений интенсивности прошедшего излучения. Проведено сравнительное исследование цветовых охватов предложенного прототипа цветовой меры и существующих мер для цветовой калибровки с учётом координат цветности наиболее часто используемых гистологических красителей.

Ключевые слова: цифровая микроскопия, сканер биомедицинских препаратов, стандартизация изображений, цветовая коррекция, цветовая калибровка, цветовая мера, калибровочная мера

Для цитирования: Махов Д. С., Сагателян Г. Р., Самородов А. В. Цветовая мера для калибровки систем цифровой микроскопии // Измерительная техника. 2021. №. 10. С. 60–64. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-60-64>

Color calibration slide for digital microscopy systems

Denis S. Makhov^{1✉}, Gayk R. Sagatelyan², Andrey V. Samorodov³

^{1, 2, 3} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹dennismak@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3794-186X>

²h_sagatelelyan@bmstu.ru

³avs@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3301-2561>

Abstract. The article is dedicated to the image standardization problem in digital microscopy. Color reproducibility in microscopic images is of great importance as this can lead to therapeutic errors in image interpretation. Color reproducibility in digital microscopy systems with various hardware can be ensured with color calibration using a special slide. The proposed requirements for color slide development are based on the analysis of the literature. A color measure prototype consisting of 97 fields of colored glass was developed and manufactured. Color chromaticity coordinates in CIE XYZ color space were calculated from experimentally determined spectral transmitted radiation distributions. A comparative study of the proposed color slide prototype and existing color slides gamuts according to the most frequently used histological dyes chromaticity coordinates have been carried out.

Keywords: digital microscopy, whole slide imaging system, image standardization, color correction, color calibration, color calibration slide, calibration target

Введение. Микроскопические исследования – один из основных видов анализа, проводимых в клинично-диагностических лабораториях. Например, в патологии микроскопические исследования применяются для выявления заболевания и определения его подтипа [1]. Цифровизация микроскопических исследований обусловила возникновение систем цифровой микроскопии (СЦМ). СЦМ предназначены для получения цифровых изображений биомедицинских препаратов и включают

аппаратную и программную составляющие. Применение СЦМ в патологии привело к появлению цифровой патологии и телепатологии [2], позволило использовать автоматизированные методы анализа и интерпретации изображений, а также дистанционно собирать консилиумы, получать консультации специалистов, повышать квалификацию медицинского персонала.

Аппаратная составляющая СЦМ реализована двумя классами устройств: автоматизированными комплексами

микроскопии, построенными на базе оптических микроскопов, и сканерами биомедицинских препаратов. Сканеры биомедицинских препаратов представляют закрытую архитектуру для достижения наибольшей производительности при получении виртуальных слайдов – цифровых копий предметного стекла. Программная составляющая включает специализированное программное обеспечение управления сканированием, получения изображений, их постобработки, просмотра и хранения. Сканеры биомедицинских препаратов официально одобрены американской ассоциацией FDA (Food and Drug Administration) в патологической практике для ряда задач первичной диагностики; разработаны рекомендации по оценке их метрологических характеристик [3]. Однако указанные рекомендации не позволяют стандартизовать получаемые виртуальные слайды, т. е. виртуальные слайды одного и того же препарата, полученные на различных системах, различны [4].

Основной вклад в различие виртуальных слайдов вносит цветовое различие, связанное с использованием разных аппаратных (осветитель, оптическая система, цифровая камера) и программных составляющих (алгоритмы постобработки полученных изображений). Указанные различия могут приводить к ошибкам интерпретации данных и, как следствие, к диагностическим и терапевтическим ошибкам.

В современной клинической практике часто применяются методы (алгоритмы) машинного и глубокого обучения с целью автоматизации проводимых исследований, в частности микроскопических [5–9]. Данные алгоритмы, независимо от их сложности, используют значения цветовых координат. Следовательно, при любом изменении (линейном и нелинейном) цветовых координат на изображении качество работы алгоритма не гарантируется. Для обеспечения воспроизводимости визуальной интерпретации цифровых изображений, полученных на различных СЦМ, необходимо обеспечить цветовое различие ΔE^* в пространстве CIE Lab менее 2,2 единиц [10]. При автоматизированном анализе допустимое цветовое различие необходимо определить для конкретного используемого алгоритма.

Задачу обеспечения воспроизводимости цвета на получаемых различными СЦМ изображениях можно решить с помощью цветовой калибровки. В [11, 12] цветовую калибровку реализуют с помощью одного из вариантов широкодоступных мер, не предназначенных напрямую для применения в СЦМ. В [13–15] проводят цифровую калибровку с помощью цветовых мер собственной разработки.

В ряде работ использована закреплённая на предметном стекле полупрозрачная мера Kodak Q60-E3 (Kodak, Китай), которая содержит 264 поля. В [11] проведено объёмное исследование для 35 различных сканеров биомедицинских препаратов и показано уменьшение цветового различия за счёт калибровки более чем в 2,5 раза. В работе [12] с использованием меры Kodak Q60-E3 исследована зависимость качества цветовой калибровки СЦМ от количества используемых цветовых полей. Показано, что набор из 60 цветовых полей оптимален с точки зрения минимизации цветового различия, которое во всех случаях превышало визуальное различимое. Ввиду зернистости плёнки цветовой меры Kodak Q60-E3 возникает неоднозначность определения её цветовых координат

при больших увеличениях СЦМ, что ставит под сомнение возможность полноценной адаптации данной цветовой меры для цветовой калибровки СЦМ.

Меры, разработанные в [13–15], выполнены в виде предметного стекла с наклеенными полями из полупрозрачной цветной плёнки (поликарбонат и полиэтилентерефталат, соответственно). Обе разработанные меры применялись для калибровки сканеров биомедицинских препаратов при исследовании гистологических образцов, окрашенных гематоксилином и эозином. В указанных работах показано уменьшение цветового различия при цветовой калибровке, однако авторам не удалось достичь стабильного уменьшения цветового различия ниже визуального различимого порога $\Delta E^*=2,2$. Недостатком предлагаемых мер является малое число их полей: 9 [13, 14], 8 [15], что не гарантирует возможность использования указанных мер при применении различных красителей. Таким образом, в настоящее время не найдено решения, пригодного для широкого применения.

Цель статьи – разработать и исследовать прототип предназначенной для СЦМ цветовой меры с высокими цветовым охватом и плотностью расположения цветовых полей.

Изготовление прототипа цветовой меры. Как следует из анализа литературы в области цветовой калибровки СЦМ, цветровая мера должна удовлетворять следующим требованиям:

прозрачность полей меры в оптическом диапазоне длин волн;

изготовление полей меры из воспроизводимых материалов, характеристики которых регламентированы стандартами (ГОСТ, DIN, ISO и т. д.);

наличие около 100 цветовых полей;

цветовой охват полей калибровочной меры, соответствующий координатам цветности наиболее распространённых красителей, используемых в медико-биологической практике.

Требование к количеству цветовых полей является оценочным и находится в соответствии с рядом представленных в научных публикациях результатов (см., например, результаты по применению цветовых мер на отражение [16] и на пропускание [12]).

Требование по цветовому охвату сформулировано согласно рекомендациям FDA (Food and Drug Administration) по определению технических характеристик WSI систем (Technical Performance Assessment of Digital Pathology Whole Slide Imaging Devices – Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff: [документ]. URL: <https://www.fda.gov/media/90791/download>). Описание методики определения воспроизводимости цвета содержит указание по применению цветовой меры (конкретная модель не указана), поля которой будут соответствовать используемым протоколам окрашивания тканей для микроскопических исследований, однако количественно данное требование не формализовано.

Для соответствия первым двум требованиям в качестве материала для изготовления полей прототипа цветовой меры использованы оптические цветные стёкла, выполненные по ГОСТ 9411-91 «Стекло оптическое цветное. Технические условия». Использование стандартизованных цветных стёкол минимизировало разброс параметров при изготовлении мер. Для изготовления прототипа цветовой меры использовался набор из 97 различных цветных стёкол.

Данные стёкла последовательно склеивали в столбики высотой примерно 20 мм. Полученные столбики нарезали для формирования рабочего слоя. Рабочие слои далее склеивали в единый блок и для придания заготовке размеров стандартного предметного стекла заливали пустоты бальзамом. Конечными операциями в изготовлении прототипа меры были шлифовка и полирование её поверхностей. Структура полученного прототипа цветовой меры и расположение на нём цветных полей представлены на рис. 1. Обозначения цветных стекол, из которых выполнены поля прототипа цветовой меры, приведены в соответствии с ГОСТ 9411-91.

Исследование цветового охвата прототипа меры. Для определения действительных координат цветности полей прототипа меры зарегистрированы спектральные распределения интенсивности проходящего света. Измерения проводили с помощью спектрометра SolarLS S100-2048H (Solar Laser Systems, Беларусь), установленного на микроскоп Meiji Techno MT4300 (Meiji Techno, Япония) с галогеновым осветителем и объективом Meiji MA840 U Plan (Meiji Techno, Япония) с характеристиками 20x/0.4, $\text{PH2} \approx 0.17$, $F=200$, $WD 7.29$. Конденсор при регистрации устанавливали в режим светлого поля. Спектральные распределения интенсивности прошедшего излучения регистрировали при полностью открытых диафрагмах коллектора и конденсора на максимальной мощности осветителя.

При регистрации осуществляли вычитание фонового спектра, время экспозиции составляло 100 мс, при получении спектра брали десять усредняемых значений, а при получении фонового спектра – пять. Для всех полей прототипа цветовой меры и осветителя микроскопа регистрировали серию из пяти спектров в различных точках цветных полей (кроме спектра осветителя) для дальнейшего усреднения. При определении цветовых координат и координат цветности полей меры для конкретного осветителя (стандартного или произвольного) рассчитывали спектральные распределения оптической плотности с использованием спектра осветителя микроскопа

без установленного на предметном столе прототипа цветовой меры. Спектральное распределение оптической плотности полей прототипа цветовой меры определяли по формуле

$$OD(\lambda) = \lg[I_0(\lambda)/I_1(\lambda)],$$

где $OD(\lambda)$ – спектральное распределение оптической плотности; λ – длина волны; $I_0(\lambda)$ – спектральное распределение интенсивности падающего от осветителя микроскопа света; $I_1(\lambda)$ – спектральное распределение зарегистрированной интенсивности прошедшего света.

Из полученных спектральных распределений оптической плотности полей прототипа цветовой меры рассчитывали координаты цвета в пространстве CIE XYZ по формулам:

$$\begin{cases} X = \int_{\lambda} I_3(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda; \\ Y = \int_{\lambda} I_3(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda; \\ Z = \int_{\lambda} I_3(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda; \end{cases}$$

$$I_3(\lambda) = I_2(\lambda) \cdot 10^{-OD(\lambda)},$$

где X, Y, Z – координаты цвета в пространстве CIE XYZ; $I_2(\lambda)$ – спектральное распределение интенсивности света для стандартного осветителя; $I_3(\lambda)$ – спектральное распределение интенсивности света после прохождения поля прототипа цветовой меры при использовании стандартного осветителя; $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ – удельные координаты цветности для стандартного колориметрического наблюдателя (угол поля зрения 2° [17]).

Для отображения на диаграмме цветности рассчитывали координаты цветности x, y в колориметрической системе XYZ как

$$\begin{cases} x = X/(X+Y+Z); \\ y = Y/(X+Y+Z). \end{cases}$$

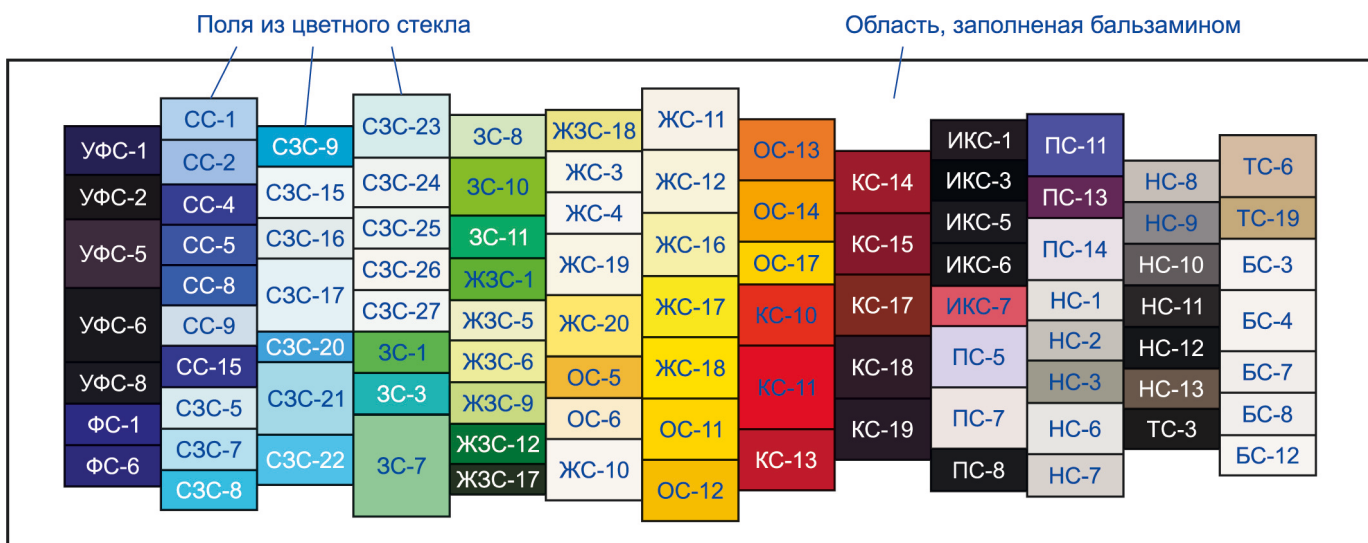


Рис. 1. Структура и схематическое расположение цветных полей прототипа цветовой меры

Fig. 1. Color calibration slide prototype structure and color fields schematic arrangement

Для оценки применимости предлагаемого прототипа меры для цветовой калибровки СЦМ рассматривали основные гистологические красители из работы George McNamara (PubSpectra – Open Data Access Fluorescence Spectra: [сайт]. URL: <https://works.bepress.com/gmcnamara/9/>), включающие AEC, DAB, эозин, FastRed, гематоксилин и MethylGreen различных производителей (всего 18 красителей). На рис. 2 приведена диаграмма цветности с указанием точки 1 белого стандартного осветителя D50, к которому приведены все координаты цветности. На диаграмме цветности представлены координаты 2 цветности гистологических красителей и выпуклая оболочка 3, построенная по ним, координаты 4 цветности полей предлагаемого прототипа цветовой меры и выпуклая оболочка 5, построенная по ним, а также выпуклые оболочки 6–8 цветовых мер, построенные по координатам цветности полей мер [13], [15] и меры Kodak Q60E3 соответственно.

Все координаты цветности рассчитаны относительно стандартного осветителя D50 и угла поля зрения 2°. При построении выпуклой оболочки для цветовой меры из статьи [13] использованы оценки спектрального распределения коэффициента пропускания, полученные по графическим данным, представленным авторами. Для цветовой меры Kodak Q60-E3 использованы значения, предоставленные производителем.

Цветовой охват разработанного авторами настоящей статьи прототипа цветовой меры покрывает 99,4 % выпуклой оболочки, построенной по координатам цветности гистологических красителей. Цветовой охват мер, предложенных в [13], [15], и меры Kodak Q60-E3 полностью покрывает координаты цветности гистологических красителей.

Для сравнения цветовых мер рассчитывают число полей на единицу площади цветового охвата. Данная метрика позволяет предсказать насколько качественной будет последующая цветная калибровка, так как при малом числе удалённых друг от друга цветовых полей алгоритмы цветовой калибровки не могут отразить нелинейность цветового преобразования, вызванного различными нелинейными факторами аппаратной составляющей СЦМ. Также большое число полей цветовой меры позволяет избежать переобучения для сложных нелинейных алгоритмов цветовой калибровки и позволяет проводить кросс-валидационную оценку качества цветовой калибровки [11].

Для предложенного прототипа меры и меры Kodak Q60-E3 данная метрика составила 1726 и 1828 соответственно. Для мер, предложенных в [13, 15], число полей на единицу площади составило 75 и 50 соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о том, что число полей на единицу площади цветового охвата для разработанного прототипа превышает на порядки ту же величину цветовых мер, предложенных в [13, 15], и сопоставимо с числом полей меры Kodak Q60-E3, которая, как отмечено выше, не может быть полностью адаптирована для СЦМ.

Заключение. Исследования показали, что цветовой охват предлагаемого прототипа почти полностью покрывает координаты цветности наиболее распространённых гистологических красителей. Число цветовых полей на единицу площади диаграммы цветности сопоставимо с числом полей на единицу площади стандартизированной меры Kodak Q60-E3

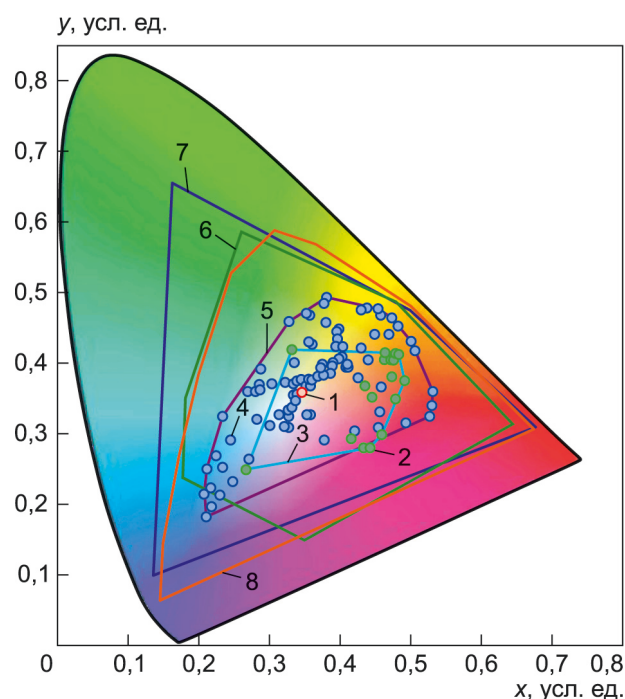


Рис. 2. Цветовые охваты гистологических красителей и полей цветных мер:

1 – точка белого стандартного колориметрического осветителя D50; 2 – координаты цветности гистологических красителей; 3 – выпуклая оболочка для координат цветности гистологических красителей; 4 – координаты цветности прототипа цветовой меры; 5 – выпуклая оболочка координат цветности для прототипа цветовой меры (97 полей); 6 – выпуклая оболочка координат цветности для цветовой меры [13] (9 полей); 7 – выпуклая оболочка координат цветности для меры [15] (8 полей); 8 – выпуклая оболочка координат цветности для Kodak Q60E3 (264 поля)

Fig. 2. Color gamuts of histological dyes and color slides' fields:

1 – point of white standard colorimetric illuminator D50; 2 – chromaticity coordinates of histological dyes; 3 – convex hull for chromaticity coordinates of histological dyes; 4 – chromaticity coordinates of a color slide prototype; 5 – chromaticity coordinates convex hull for a color slide prototype (97 fields); 6 – chromaticity coordinates convex hull for slide [13] (9 fields); 7 – chromaticity coordinates convex hull for slide [15] (8 fields); 8 – chromaticity coordinates convex hull for Kodak Q60E3 (264 fields)

и существенно превышает предлагаемые рядом научных коллективов решения. В отличие от меры Kodak Q60-E3, обладающей зернистостью и не предназначенной для применения в СЦМ при больших увеличениях, предлагаемый прототип цветовой меры специально разработан для цветовой калибровки СЦМ.

Список источников

1. Rosai J., *Laboratory investigation*, 2007, vol. 87, no. 5, pp. 403–408. <https://doi.org/10.1038/labinvest.3700551>
2. Al-Janabi S., Huisman A., Van Diest P. J., *Histopathology*, 2012, vol. 61, no. 1, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2559.2011.03814.x>
3. Evans A. J., Bauer T. W., Bui M. M. et al., *Archives of pathology and laboratory medicine*, 2018, vol. 142, no. 11, pp. 1383–1387. <https://doi.org/10.5858/arpa.2017-0496-CP>
4. Clunie D. A., *Toxicologic Pathology*, 2020, vol. 49, iss. 4, pp. 738–749. <https://doi.org/10.1177/0192623320965893>

5. Makhov D., Samorodov A., Slavnova E., *26th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, Yaroslavl, Russia, 20–24 April, 2020, IEEE, 2020, pp. 270–277.
<https://doi.org/10.23919/FRUCT48808.2020.9087455>
6. Parpulov D., Samorodov A., Makhov D., Slavnova E., Volchenko N., Iglovikov V., *2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*, Yekaterinburg, Russia, 7–8 May, 2018, IEEE, 2018, pp. 87–90.
<https://doi.org/10.1109/USBREIT.2018.8384557>
7. Dobrolyubova D. A., Kravtsova T. A., Samorodova O. A., Samorodov A. V., Slavnova E. N., Volchenko N. N., *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2016, vol. 26, no. 3, pp. 552–557.
<https://doi.org/10.1134/S1054661816030032>
8. Tsykunov D. V., Kolokolnikov G. A., Samorodov A. V., *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, St. Petersburg and Moscow, Russia, 27–30 January, 2020, IEEE, 2020, pp. 2564–2567. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039509>
9. Samorodov A. V., *Pattern recognition and image analysis*, 2013, vol. 23, no. 4, pp. 508–511. <https://doi.org/10.1134/S1054661813040159>
10. Stokes M., Fairchild M. D., Berns R. S., *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 1992, vol. 11, no. 4, pp. 406–422.
<https://doi.org/10.1145/146443.146482>
11. Shrestha P., Hulsken B. *Journal of Medical Imaging*, 2014, vol. 1, no. 2, 027501. <https://doi.org/10.1117/1.jmi.1.2.027501>
12. Кравцова Т. А., Добролюбова Д. А., Самородов А. В. Сравнительное исследование методов цветовой коррекции изображений для задач цветовой калибровки автоматизированных комплексов микроскопии биомедицинских препаратов // Наука и Образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана: сетевой журнал. 2016. № 2. С. 91–104. URL: <http://engineering-science.ru/doc/833329.html> (дата обращения 01.09.2021).
13. Bautista P. A., Hashimoto N., Yagi Y., *Journal of pathology informatics*, 2014, vol. 5, 4. <https://doi.org/10.4103/2153-3539.126153>
14. Yagi Y., *Diagnostic pathology*, 2011, vol. 6, S15.
<https://doi.org/10.1186/1746-1596-6-S1-S15>
15. Korzynska A., Zak J., Roszkowiak L., Pijanowska D., Markiewicz T., *2016 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*, Chania, Greece, 4–6 October, 2016, IEEE, 2016, pp. 48–53. <https://doi.org/10.1109/IST.2016.7738196>
16. Menesatti P., Angelini C., Pallottino F., Antonucci F., Aguzzi J., Costa C., *Sensors*, 2012, vol. 12, no. 6, pp. 7063–7079.
<https://doi.org/10.3390/s120607063>
17. CIE, Fundamental chromaticity diagram with physiological axes, part 1, Commission Internationale de l'Eclairage. URL: <http://cie.co.at/publications/fundamental-chromaticity-diagram-physiological-axes-part-1> (дата обращения 01.09.2021).
2. Al-Janabi S., Huisman A., Van Diest P. J., *Histopathology*, 2012, vol. 61, no. 1, pp. 1–9.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2559.2011.03814.x>
3. Evans A. J., Bauer T. W., Bui M. M. et al., *Archives of pathology and laboratory medicine*, 2018, vol. 142, no. 11, pp. 1383–1387. <https://doi.org/10.5858/arpa.2017-0496-CP>
4. Clunie D. A., *Toxicologic Pathology*, 2020, vol. 49, iss. 4, pp. 738–749. <https://doi.org/10.1177/0192623320965893>
5. Makhov D., Samorodov A., Slavnova E., *26th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, Yaroslavl, Russia, 20–24 April, 2020, IEEE, 2020, pp. 270–277.
<https://doi.org/10.23919/FRUCT48808.2020.9087455>
6. Parpulov D., Samorodov A., Makhov D., Slavnova E., Volchenko N., Iglovikov V., *2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*, Yekaterinburg, Russia, 7–8 May, 2018, IEEE, 2018, pp. 87–90.
<https://doi.org/10.1109/USBREIT.2018.8384557>
7. Dobrolyubova D. A., Kravtsova T. A., Samorodova O. A., Samorodov A. V., Slavnova E. N., Volchenko N. N., *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2016, vol. 26, no. 3, pp. 552–557.
<https://doi.org/10.1134/S1054661816030032>
8. Tsykunov D. V., Kolokolnikov G. A., Samorodov A. V., *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, St. Petersburg and Moscow, Russia, 27–30 January, 2020, IEEE, 2020, pp. 2564–2567.
<https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039509>
9. Samorodov A. V., *Pattern recognition and image analysis*, 2013, vol. 23, no. 4, pp. 508–511. <https://doi.org/10.1134/S1054661813040159>
10. Stokes M., Fairchild M. D., Berns R. S., *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 1992, vol. 11, no. 4, pp. 406–422.
<https://doi.org/10.1145/146443.146482>
11. Shrestha P., Hulsken B. *Journal of Medical Imaging*, 2014, vol. 1, no. 2, 027501. <https://doi.org/10.1117/1.jmi.1.2.027501>
12. Kravtsova T. A., Dobrolyubova D. A., Samorodov A. V., *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2016, no. 02, pp. 91–104, available at: <http://engineering-science.ru/file/835206.html> (accessed: 01.09.2021). (In Russ.)
13. Bautista P. A., Hashimoto N., Yagi Y., *Journal of pathology informatics*, 2014, vol. 5, 4. <https://doi.org/10.4103/2153-3539.126153>
14. Yagi Y., *Diagnostic pathology*, 2011, vol. 6, S15.
<https://doi.org/10.1186/1746-1596-6-S1-S15>
15. Korzynska A., Zak J., Roszkowiak L., Pijanowska D., Markiewicz T., *2016 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*, Chania, Greece, 4–6 October, 2016, IEEE, 2016, pp. 48–53. <https://doi.org/10.1109/IST.2016.7738196>
16. Menesatti P., Angelini C., Pallottino F., Antonucci F., Aguzzi J., Costa C., *Sensors*, 2012, vol. 12, no. 6, pp. 7063–7079.
<https://doi.org/10.3390/s120607063>
17. CIE, Fundamental chromaticity diagram with physiological axes, part 1, Commission Internationale de l'Eclairage, available at: <http://cie.co.at/publications/fundamental-chromaticity-diagram-physiological-axes-part-1> (accessed: 01.09.2021).

Reference

1. Rosai J., *Laboratory investigation*, 2007, vol. 87, no. 5, pp. 403–408. <https://doi.org/10.1038/labinvest.3700551>

Статья поступила в редакцию 10.03.2021; одобрена после рецензирования 24.06.2021; принята к публикации 01.07.2021.
The article was submitted 10.03.2021; approved after reviewing 24.06.2021; accepted for publication 01.07.2021.

Газовые сенсоры для измерений концентрации вредных веществ: особенности применения

Владислав Михайлович Тележко¹, Михаил Владимирович Тютчев^{2✉}, Мария Валериевна Аверьянова³, Александр Дмитриевич Паранин⁴, Евгений Владимирович Хойна⁵

1, 2, 3, 4, 5 ООО «Информаналитика», Санкт-Петербург, Россия, ¹telezhko@mail.ru, ²tyutchevmv48@mail.ru✉, ⁴paranin@yandex.ru, ⁵ortes@list.ru

Аннотация. Рассмотрены основные достоинства и недостатки газовых сенсоров, используемых при измерениях содержания ряда вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Перечислены основные стандарты и нормативные документы, устанавливающие требования к средствам измерений содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Описана экспериментальная установка для исследования характеристик амперометрических сенсоров, методика проведения и результаты эксперимента. Представлены результаты сравнительного анализа характеристик амперометрических сенсоров вредных газов, выпускаемых различными производителями. Даны рекомендации по практическому использованию полученных данных при разработке средств измерений содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны, соответствующих требованиям отечественных нормативных документов.

Ключевые слова: амперометрический сенсор, вредное вещество, токсичный газ, предельно допустимая концентрация, газоанализатор

Для цитирования: Тележко В. М., Тютчев М. В., Аверьянова М. В., Паранин А. Д., Хойна Е. В. Газовые сенсоры для измерений концентрации вредных веществ: особенности применения // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 65–71. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-65-71>

Gas sensors for measurement of the concentration toxic substances: peculiarities of the use

Vladislav M. Telezhko¹, Mikhail V. Tyutchev^{2✉}, Marija V. Averianova³, Alexandr D. Pararin⁴, Evgeniy V. Khoina⁵

1, 2, 3, 4, 5 Informanalytica, Ltd, St. Petersburg, Russia, ¹telezhko@mail.ru, ²tyutchevmv48@mail.ru✉, ⁴paranin@yandex.ru, ⁵ortes@list.ru

Abstract. The advantages and disadvantages of the gas sensors for measurement of content of the toxic substances in a working zone are reviewed. The main standards and normative documents setting the requirements for instrument for measuring of content of the harmful substances in a working zone air are considered. Experimental setup for research of the amperometric sensors characteristics, measurement procedure and experimental results are described. Comparative analysis of the characteristics of sensors produced by various manufacturers are presented. Recommendations are given on the practical use of the obtained data for development of the measuring instruments satisfying the requirements of the domestic regulations.

Keywords: amperometric sensor, harmful substance, toxic gas, gas analyzer, threshold limiting value

Введение. В мире уделяется большое внимание соблюдению гигиенических норм содержания вредных веществ и, в частности, вредных газов (ВГ) в воздухе рабочей зоны. Растёт производство и постоянно улучшаются технические характеристики газовых сенсоров и газоанализаторов для измерения содержания ВГ. Требования к метрологическому обеспечению таких измерений основаны на гигиенических нормативах, которые в разных странах могут значительно различаться. В РФ содержание вредных веществ в воздухе принято выражать в единицах массовой концентрации (миллиграммах, делённых на кубические метры). В ряде других стран (Германия, Великобритания, США и др.), как правило, содержание выражается в объёмных долях (миллионных долях в минус первой степени, ppm). Пересчёт между

перечисленными выше единицами измерений содержания проводится с учётом температуры и давления среды.

В настоящее время большинство газоанализаторов, измеряющих концентрацию ВГ в воздухе рабочей зоны, оснащено электрохимическими амперометрическими сенсорами (АС) [1, 2]. По сравнению с активно разрабатываемыми в настоящее время полупроводниковыми газовыми сенсорами [3], АС имеют линейную зависимость выходного сигнала от концентрации газа в широком диапазоне её измерения, более высокую селективность по отношению к мешающим газам, практически не потребляют энергии, устойчивы к изменению влажности окружающего воздуха, не требуют нагрева (полупроводниковые сенсоры требуют нагрева до температуры 200–450 °С), а также длительной тренировки

сенсора при подключении его к источнику питания. Уникальные характеристики АС позволяют использовать их для измерения малых концентраций (0,01–10 ppm) при диагностике некоторых заболеваний [4, 5] и анализе атмосферного воздуха жилой среды [6]. В последнее время большие успехи достигнуты в разработке миниатюрных АС с использованием технологий микроэлектроники [7]. Однако АС зарубежного производства, как правило, не адаптированы для измерения концентраций ВГ на уровне предельно допустимых концентраций (ПДК) в воздухе рабочей зоны, принятых в РФ. Во-первых, нормативные значения ПДК некоторых ВГ в РФ значительно ниже, чем в большинстве других стран, поэтому зарубежные сенсоры для измерения концентраций таких ВГ имеют недостаточно высокое разрешение и избыточно большой диапазон измерения концентраций. Во-вторых, зарубежные сенсоры ВГ остронаправленного действия (класс «О» согласно ГОСТ 12.1005-88 «Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны») часто не удовлетворяют требованиям отечественных ГОСТ 12.1.005-88 и

ГОСТ 13320-81 «Газоанализаторы промышленные автоматические. Общие технические условия» к быстродействию $t_{0,9}$ газоанализатора ($t_{0,9} \leq 30$ с) а следовательно, и сенсора, являющегося первичным преобразователем концентрации газа в измеряемый сигнал. Кроме того, зарубежные серийные АС рассчитаны, в основном, на работу при температуре не ниже -20 °С, что для большого числа российских регионов, согласно ГОСТ 15150-69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды», является неприемлемым. И, наконец, отсутствуют зарубежные АС, работающие в условиях повышенной относительной влажности RH воздуха вплоть до $RH=100$ %. В России, кроме ООО «Информаналитика», АС ВГ изготавливают на предприятиях ОАО «Аналитприбор», ООО «Росен». На предприятии ОАО «Аналитприбор» для некоторых ВГ производят газоанализаторы с АС – электрохимическими ячейками, интегрированными в эти приборы. Информация о технических характеристиках электрохимических ячеек как самостоятельных АС в известной авторам настоящей статьи литературе отсутствует. Появившийся недавно производитель сенсоров ООО «Росен» предлагает для российских потребителей сенсоры, предназначенные для измерения содержания пока ограниченного числа ВГ и работающие в ограниченном диапазоне влажности воздуха (30–95 %).

Цель настоящей работы – экспериментально исследовать характеристики АС ВГ, разработанных ООО «Информаналитика», сравнить их с характеристиками существующих сенсоров и дать рекомендации по практическому использованию полученных данных при разработке средств измерений содержания ВГ в воздухе рабочей зоны (газоанализаторов), соответствующих требованиям отечественных нормативных документов.

Принцип работы и основные характеристики АС ВГ.

АС представляет собой электрохимическую ячейку [1], в которой при поступлении анализируемой газовой смеси на индикаторный электрод генерируется электрический ток $I = I_p + I_{\phi}$ между индикаторным и вспомогательным электродами, где I_p – ток, обусловленный реакцией (изменением концентрации) анализируемого газа; I_{ϕ} – фоновый ток сенсора. При поступлении исследуемого газа на индикаторный электрод концентрация газа C связана с I_p выражением $C = I_p / K$, где K – чувствительность сенсора. Для поддержания в процессе работы постоянного электрохимического потенциала индикаторного электрода в сенсор часто встраивают третий, референсный электрод (ЗЕ-сенсор), при этом АС включают в схему потенциостата. Электрическая схема потенциостата, применяемая для трёхэлектродного сенсора с индикаторным s -, референсным r - и вспомогательным c -электродами, приведена на рис. 1. Измерительный электрод соединён с инвертирующим входом операционного усилителя, который служит для преобразования тока в напряжение. Референсный электрод с использованием другого операционного усилителя задаёт потенциал s -электрода,

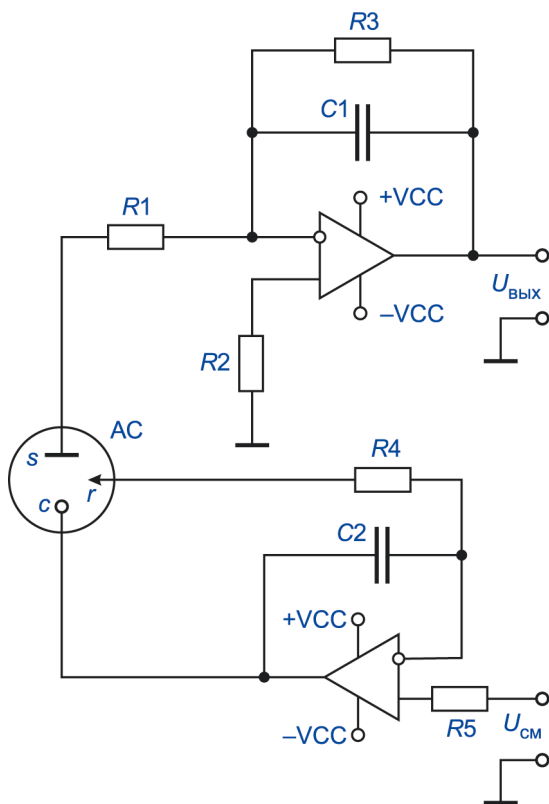


Рис. 1. Принципиальная схема потенциостата для трёхэлектродного сенсора:

АС – сенсор с индикаторным s -, референсным r - и вспомогательным c -электродами; сопротивления $R_1, R_2 = 10 \dots 100$ Ом; $R_4, R_5 = 10$ кОм; $U_{\text{Вых}} = I_{\text{АС}} R_3$; $U_{\text{см}} = 0$

Fig. 1. Schematic diagram of the electronic circuit for 3-electrodes sensor:

S – sensor; s – working electrode; r – reference electrode; c – counter electrode; resistors $R_1, R_2 = 10 \dots 100$ Ом; $R_4, R_5 = 10$ кОм; $U_{\text{out}} = I_s R_3$ $U_{\text{offset}} = 0$

а также позволяет смещать его потенциал на $U_{\text{см}}$ для некоторых видов сенсоров.

Большинство АС ВГ содержат водный электролит, который находится в термодинамическом равновесии с влажой окружающего воздуха. АС с электролитами на основе полимеров и органических ионных жидкостей [8, 9] пока не нашли широкого применения. Большинство серийных АС зарубежных производителей гарантированно работают, когда относительная влажность окружающего воздуха находится в диапазоне $RH=15-90\%$ (City Technology Ltd. Industrial safety. Sensor selector. Data sheets: [сайт]. URL: <https://www.citytech.com/en-gb/>; Alphasense Ltd. Data sheets: [сайт]. URL: <https://www.alphasense.com/index.php/safety/product/>; Membrapor AG. Products. Specification sheets: [сайт]. URL: <https://www.membrapor.ch/products/>; Winsen Electronic Technology Co. Ltd. Data sheets: [сайт]. URL: <https://www.winsen-sensor.com/sensors/toxic-gas-sensors/>) при температуре окружающей среды $T_{\text{в}}=-20...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поскольку ПДК большинства ВГ довольно низкая и при измерении концентрации необходимо соблюдать требование $t_{0,9} \leq 30\text{ с}$, то основными характеристиками АС, определяющими возможность их использования в газоанализаторах ВГ, являются разрешение R , чувствительность K и быстродействие $t_{0,9}$. Селективность АС и проблема проведения измерений при недостаточной селективности составляют предмет отдельного рассмотрения и выходят за пределы настоящей статьи.

Разрешение сенсора равно среднеквадратичному значению шумового тока $I_{\text{ш}}$ сенсора, выраженному в единицах массовой концентрации или объёмных долях: $R=I_{\text{ш}}/K$. Уменьшение $I_{\text{ш}}$ путём применения в газоанализаторе методов усреднения шумового сигнала повышает разрешение прибора, однако при этом увеличивает $t_{0,9}$, которое для газоанализаторов ВГ класса «О» (ВГ остронаправленного действия) не может превышать 30 с, что уже сопоставимо с $t_{0,9}$ лучших современных сенсоров указанных ВГ. При отсутствии в газоанализаторе усреднения шумового тока разрешение сенсора непосредственно определяет пределы допускаемой погрешности прибора, т. е. значение R не может превышать пределов допускаемой абсолютной погрешности A_{max} газоанализатора в точке, соответствующей значению ПДК:

$$A_{\text{max}} = b_m \text{ ПДК}, \quad (1)$$

где $b_m = \pm 0,25$ для веществ с ПДК $\geq 1\text{ мг/м}^3$, допускается $b_m = \pm 0,5$ для веществ с ПДК $< 1\text{ мг/м}^3$ (см. ГОСТ 12.1.005-88).

Поскольку максимально допустимое значение разрешения $R_{\text{max}} = A_{\text{max}}$, то максимально допустимые в РФ разрешения можно определить по формуле

$$R_{\text{max}} = (I_{\text{ш}}/K)_{\text{max}} = b_m \text{ ПДК}. \quad (2)$$

Значения ПДК (в единицах массовой концентрации) вредных веществ в воздухе рабочей зоны указаны в отечественных нормативных документах СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или)

безвредности для человека факторов среды обитания» и ГОСТ 12.1.005-88. Принятые в других странах предельно допустимые концентрации $C_{\text{пд}}$ регламентируются зарубежными нормативными документами и заносятся в постоянно обновляемый международный банк данных $C_{\text{пд}}$ (GESTIS International Limit Values for chemical agents, OELs: [сайт]. URL: <https://limitvalue.ifa.dguv.de/WebForm>).

В табл. 1 приведены нормы предельно допустимой концентрации вредных газов, принятые в Германии (AGS), США (OSHA), Великобритании (WEL), Китайской Народной Республике (КНР) и России, а также отношение $\eta = C_{\text{пд}}/\text{ПДК}$; полужирным шрифтом отмечены значения ПДК ВГ для АС остронаправленного действия; знак * означает, что значение применяется при пребывании персонала в рабочей зоне в течение времени, меньшего чем восьмичасовой рабочий день. Из табл. 1 следует, что $C_{\text{пд}}$ достаточно часто превышает значение ПДК ($\eta > 1$), причём эти отличия наиболее заметны для газов с ПДК $< 1\text{ ppm}$. Поэтому в соответствии с условием (2) в России могут использоваться только сенсоры с достаточно малыми значениями R_{max} и $(I_{\text{ш}}/K)_{\text{max}}$.

Экспериментальная установка и исследование характеристик сенсоров. Использованная типичная для исследования АС установка (рис. 2) содержит сенсор 2, установленный в адаптер 1, в который подаётся смесь воздуха с исследуемым газом от генератора поверочных газовых смесей (ПГС) 6, потенциостат 3 и аналогово-цифровой преобразователь АЦП 4. Сигнал АЦП регистрируется с помощью персонального компьютера 5 на электронном самописце в виде зависимости $I_p(t)$. Временное разрешение регистрирующей системы не превышает 0,1 с; среднеквадратичное значение шумового тока $I_{\text{ш}}$ (регистрируется на экране самописца) составляет 40–50 нА. В качестве генераторов ПГС служат поверочные средства 1-го разряда – разработанные и серийно выпускаемые ООО «Информаналитика» генераторы «ИНФАН ЭХГР» (для ПГС газов Cl_2 , HF, HCN), «ИНФАН ГР» (для ПГС газов CO, H_2S , SO_2 , NH_3), «ИНФАН ФХГ-НCl», которые позволяют получать газозоудную смесь с заданным

Таблица 1

Принятые в различных странах нормы ПДК, ppm (мг/м³), ВГ и отношение η значений ПДК, принятых за рубежом и в РФ

ВГ	Германия	США	Великобритания	КНР	РФ	η
O ₃	–	0,1 (0,2)	0,2 (0,4)*	0,15(0,3)*	0,05 (0,1)	2–4
HCN	0,9 (1)	10 (11)	0,9 (1)	0,9(1)*	0,27 (0,3)	3–37
Cl ₂	0,5 (1,5)	1 (3)*	0,5 (1,5)*	0,34(1)*	0,34 (1)	1–3
HF	1 (0,83)	3(2,5)	1,8 (1,5)	2,4(2)*	0,6 (0,5)	1,7–5
NO ₂	0,5 (0,96)	5 (9)*	0,5 (0,96)	2,6 (5)	1 (2)	0,5–5
HCl	2 (3)	5 (7)*	1 (1,5)	5(7,5)*	3,3 (5)	0,3–1,2
CO	30 (35)	50(55)	20(23)	17(20)*	17 (20)	1–2,7
H ₂ S	5 (7,1)	20(28)*	5(7)	7(10)*	7 (10)	0,7–2,8
SO ₂	1 (2,5)	5 (13)	0,5 (1,3)	1,9 (5)	3,8 (10)	0,13–1
NH ₃	20 (14)	50 (35)	25 (18)	28 (20)	28 (20)	0,7–1,8

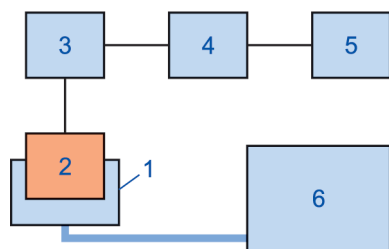


Рис. 2. Блок-схема испытательной установки:

1 – газовый адаптер; 2 – сенсор; 3 – потенциостат; 4 – аналого-цифровой преобразователь; 5 – персональный компьютер; 6 – генератор поверочных газовых смесей

Fig. 2. Block diagram of the experimental setup:

1 – gas adapter; 2 – sensor; 3 – potentiostat; 4 – analog to digital converter; 5 – personal computer; 6 – calibration gas generator

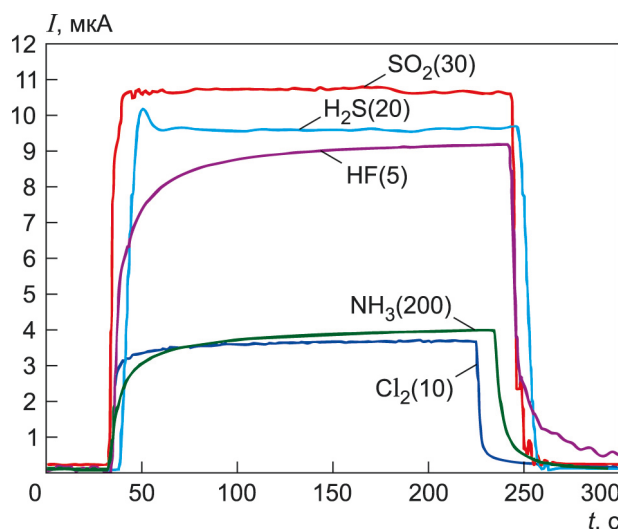

 Рис. 3. Переходные характеристики газовых сенсоров Cl_2 , NH_3 , HF , H_2S , SO_2 ; в скобках указаны концентрации газов в мг/м^3

 Fig. 3. Transient responses for gas sensors Cl_2 , NH_3 , HF , H_2S , SO_2 ; in brackets are mass concentrations of the gases in мг/м^3

содержанием ВГ с относительной погрешностью не более 7 % в диапазоне 0,2–20 ПДК. При исследовании сенсоров газов O_3 , NO_2 в качестве генераторов ПГС использовали генератор ГС-024-1 и генератор-разбавитель 667ГР-03М соответственно. По известному значению концентрации ВГ и измеренным значениям I_ϕ , I_ψ , $I_p(t)$ для каждого сенсора определяли значения K , R , $t_{0,9}$, вариацию, диапазон концентраций исследуемого газа с линейной зависимостью тока от концентрации, чувствительность к нецелевым газам (селективность), устойчивость к газовым перегрузкам. Кроме того, для группы сенсоров (10–12 штук) каждого типа проводили ресурсные испытания и исследовали зависимости тока сенсора от температуры окружающего воздуха $I_p(T_\text{в})$. Для исследования зависимости $I_p(T_\text{в})$ каждой ПГС газовый адаптер с сенсором устанавливали в термокамеру, температура в которой могла изменяться от -40 до $+50$ °С.

При разработке сенсоров, предназначенных для работы в условиях повышенной влажности, провели эксперимент.

Внутри корпуса сенсора рядом с входной частью был установлен миниатюрный нагреватель для уменьшения локального значения RH окружающего воздуха. Цель эксперимента состояла в определении оптимальной мощности нагрева $P_{\text{опт}}$, при которой, с одной стороны, нагрев сенсора не приводит к изменению его исследуемых характеристик, с другой стороны, локальное значение RH на входной мембране уменьшается до допустимого значения 85–90 % при $RH=100$ % анализируемой газовой смеси. Для определения $P_{\text{опт}}$ в сенсоре вместо входной мембраны был установлен миниатюрный цифровой датчик температуры и относительной влажности AM2302. Температура воздуха вблизи входа в сенсор и температура электрохимической ячейки внутри сенсора измерялись поверенными термодатчиками. Питание нагревателя сенсора осуществлялось с помощью блока питания напряжением 5 В. Сенсор помещался в герметичный эксикатор, наполненный для получения требуемого значения RH либо насыщенным раствором соответствующей соли, либо воды (для достижения $RH=100$ %).

Результаты исследования характеристик сенсоров.

Из выражения (2) следует, что для реализации малого разрешения сенсор должен быть высокочувствительным и использоваться в измерительной системе с низким уровнем шума. Несмотря на то, что у всех производителей АС измерительная система подобна приведённой на рис. 1, каждый производитель обычно рекомендует собственную измерительную систему для определения значений R или I_ψ . Для серийных АС основных производителей обычно $I_\psi=10\ldots 50$ нА.

Чувствительность K сенсора зависит от нескольких факторов. Повышение чувствительности только путём увеличения потока исследуемого газа, падающего на индикаторный электрод, может привести к нарушению диффузионно-лимитирующего режима работы АС, который является базисным принципом стабильной работы сенсора [2]. В отдельных случаях удаётся улучшить характеристики сенсора путём смещения потенциала рабочего электрода относительно потенциала сравнительного электрода на оптимальное для сенсора данного типа значение $U_{\text{см}}$, как показано в работе [10] на примере АС циановодорода. Однако применение указанного метода смещения требует непрерывного электропитания потенциостата, что не всегда удобно для АС в составе переносных газоанализаторов. Поэтому в настоящей работе повышение разрешения и быстродействия сенсора достигалось путём увеличения электрокаталитической активности (ЭА) электродов при $U_{\text{см}}=0$, а также введения в электролит химического соединения-посредника (медиатора) электрохимической реакции, который при воздействии на него исследуемого газа дополнительно увеличивает ток сенсора. Для повышения ЭА в качестве материала электродов подбирали наиболее эффективные электрокатализаторы, в том числе новые электродные материалы – углеродные нанотрубки и фуллерены. В сенсоре HCN для повышения ЭА индикаторного электрода (помимо использования более каталитически активного материала) увеличивали его потенциал до значения $U_{\text{см}}=200$ мВ [10]. Заметим, что при повышении ЭА индикаторного электрода,

Таблица 2

Характеристики АС ВГ зарубежных и российских производителей

ВГ	Тип АС (производитель)	$R_{\max}$, ppm	R , ppm	K , мкА/ppm	$t_{0,9}$, с, не более	ΔT_B , °C
O ₃	2E-O ₃ (INF)	0,03	0,02	3,00–4,00	30	–40...+50
	OX-B431 (AS)	0,03	0,01	0,22–0,75	80	–30...+40
	O ₃ /S-5-S (MP)	0,03	0,03	1,00–2,00	60	–40...+50
	ME3-O ₃ (WIN)	0,03	0,20	0,45–0,75	120	–20...+50
	Sensoric O ₃ 3E1 (CT)	0,03	0,02	1,00–2,00	60	–20...+40
HCN	3E-HCN (INF)	0,13	0,05	2,00–2,50	25	–40...+50
	HCN-D4 (AS)	0,13	0,03	0,03–0,05	50	–30...+50
	HCN/S-100 (MP)	0,13	0,05	0,45–0,75	25	–20...+50
	4HN CiTiceL (CT)	0,13	0,50	0,08–0,12	200	–20...+50
Cl ₂	2E-Cl ₂ (INF)	0,09	0,08	0,80–1,00	30	–40...+50
	Cl ₂ -D4 (AS)	0,09	0,10	0,15–0,35	35	–20...+50
	Cl ₂ /S-20-S (MP)	0,09	0,05	0,65–1,15	60	–40...+50
	ME3-Cl ₂ (WIN)	0,09	0,10	0,45–0,75	60	–20...+50
	4CL CiTiceL (CT)	0,09	0,10	0,45–0,75	60	–20...+50
HF	3E-HF-2T(5) (INF)	0,30	0,15	0,60–0,80	30	–40...+50
	HF/M-10 (MP)	0,30	0,10	0,07–0,15	60	–10...+50
	ME 3–HF (WIN)	0,30	0,10	0,25–0,55	90	–20...+50
	Sensoric HF 3E (CT)	0,30	0,15	0,20–0,40	90	–20...+40
NO ₂	3E-NO ₂ (INF)	0,25	0,25	0,25–0,30	30	–40...+50
	NO ₂ -D4 (AS)	0,25	0,10	0,10–0,35	35	–20...+50
	NO ₂ /M-20 (MP)	0,25	0,10	0,45–0,75	40	–40...+50
	ME4-NO ₂ (WIN)	0,25	0,10	1,20–1,50	30	–20...+50
	4ND CiTiceL (CT)	0,25	0,10	0,45–0,75	25	–20...+50
HCl	3E-HCl (INF)	0,82	0,30	0,18–0,22	30	–40...+50
	HCl-D4 (AS)	0,82	0,30	0,03–0,05	50	–30...+50
	HCl/C-200 (MP)	0,82	1,00	0,065–0,135	–	–20...+40
	ME3-HCl (WIN)	0,82	0,10	0,40–1,20	30	–20...+50
	Sensoric HCl 3E 300 (CT)	0,82	0,70	0,08–0,20	70	–20...+40
CO	3E-CO (INF)	4,20	0,50	0,10–0,20	30	–40...+50
	CO-D4 (AS)	4,20	1,50	0,030–0,055	25	–20...+50
	CO/MF-500 (MP)	4,20	0,80	0,05–0,09	25	–40...+50
	ME4-CO (WIN)	4,20	1,00	0,06–0,10	25	–20...+50
	3E CiTiceL CO (CT)	4,20	0,50	0,080–0,012	25	–20...+50
H ₂ S	3E-H ₂ S (INF)	1,80	0,20	0,30–0,50	25	–40...+50
	H ₂ S-AH (AS)	1,80	0,03	0,90–1,50	30	–30...+50
	H ₂ S/M-500 (MP)	1,80	0,50	0,08–0,12	25	–40...+50
	ME3- H ₂ S (WIN)	1,80	0,10	0,65–0,95	30	–20...+50
	4H SiTiceL (CT)	1,80	0,10	0,95–1,45	30	–40...+50
SO ₂	3E-SO ₂ -2T(5) (INF)	0,94	0,20	0,60–1,00	15	–40...+50
	SO ₂ -D4 (AS)	0,94	0,20	0,18–0,42	15	–20...+50
	SO ₂ /MF-100 (MP)	0,94	0,20	0,30–0,44	20	–20...+50
	ME4- SO ₂ (WIN)	0,94	0,10	0,60–1,00	30	–20...+50
	7SH CiTiCeL (CT)	0,94	0,10	1,00–1,50	15	–20...+50

кроме увеличения чувствительности и уменьшения разрешения АС, как правило, уменьшается и его быстродействие $t_{0,9}$ [10]. Быстродействие $t_{0,9}$ всех разрабатываемых сенсоров измерялось при ступенчатом изменении концентрации ВГ, поступающего в газовый адаптер, согласно методическим требованиям ГОСТ 13320-81. На рис. 3 представлены переходные характеристики значений $I_p(t)$ сенсоров Cl₂, H₂S, SO₂, HF, NH₃. В результате исследований были разработаны АС ВГ, удовлетворяющие условию $t_{0,9} \leq 30$ с. Для определения разрешения R каждого сенсора измерялись значения I_w , K . Достаточно большой размах значений чувствительности от $K_{\min}$ до $K_{\max}$ разных экземпляров АС одного типа главным образом связан с точностью выполнения технологического регламента на всех этапах изготовления сенсора и является типичным для серийных АС ВГ различных фирм-производителей. В этом случае значение R всей группы АС данного типа, которая указывается в технических характеристиках, определяется отношением $R = I_w / K_{\min}$.

Для проверки применимости разработанных АС ВГ в составе газоанализаторов, предназначенных для работы в климатической зоне умеренного климата (класс «У» согласно ГОСТ 15150-69), проводили испытания сенсоров в диапазоне температуры окружающего воздуха $\Delta T_B = -40...+50$ °C. По результатам испытаний установили, что АС ВГ можно эксплуатировать в указанном диапазоне температур, для всех сенсоров с повышением T_B наблюдается незначительное увеличение I_p . Для газоанализаторов «Хоббит» и «Ока» (ООО «Информаналитика». Газоанализаторы: [сайт]. URL: <https://www.infogas.ru>) возникающее при этом изменение показаний укладывается в пределы суммы допускаемых основной и дополнительной погрешностей.

Исследование распределения температуры внутри нагреваемого сенсора и вблизи него позволило определить оптимальную мощность миниатюрного нагревателя, при которой нагрев не приводит к изменению технических характеристик АС, но при этом обеспечивает долговременную эксплуатацию сенсора при $RH = 99...100$ % анализируемой газовой смеси. Серийный выпуск сенсоров NE-XX-2T(5), предназначенных для работы на воздухе при $RH = 30...100$ % осуществляет ООО «Информаналитика»

Окончание таблицы 2

ВГ	Тип АС (производитель)	$R_{\max}$, ppm	R , ppm	K , мкА/ppm	$t_{0,9}$, с, не более	$\Delta T_{\text{в}}$, °С
NH ₃	2E-NH ₃ (INF)	7,00	3,00	0,015–0,020	30	–40...+50
	NH ₃ /MR-1000 (MP)	7,00	2,00	0,017–0,033	35	–10...+50
	ME3-NH ₃ (WIN)	7,00	0,50	0,05–0,15	90	–20...+50
	SensoricNH ₃ 3E1000SE (CT)	7,00	12,00	0,008–0,012	90	–20...+40

(Россия). Газоанализаторы с этими серийными сенсорами успешно прошли как испытания в целях утверждения типа, так и первичную и периодические поверки в соответствии с требованиями отечественных нормативных документов.

В табл. 2 приведены следующие характеристики разработанных и серийно выпускаемых в настоящее время в ООО «Информаналитика» (обозначено как INF) АС ВГ (ООО «Информаналитика»). Сенсоры: [сайт]. URL: <https://www.infogas.ru>: вычисленные по формуле (2) значения максимально допустимого разрешения $R_{\max}$; измеренные значения K ; быстродействие $t_{0,9}$; $R = I_{\text{ш}}/K_{\min}$, а также температурный диапазон работы $\Delta T_{\text{в}}$. Для сравнения указаны значения аналогичных характеристик АС ВГ основных мировых производителей – Alphasense (Великобритания), Membrapor (Швейцария), Winsen (КНР), City Technology (Великобритания), обозначенных соответственно AS, MP, WIN, CT. Сенсоры имеют примерно одинаковый диапазон измерения концентрации каждого представленного ВГ. Если фирма производит несколько сенсоров для конкретного ВГ, то в табл. 2 указан тип АС с минимальными разрешением и быстродействием. АС всех рассматриваемых ВГ (кроме SO₂, NH₃) – сенсоры газов остронаправленного действия.

Из табл. 2 следует, что быстродействие и разрешение АС ВГ производства ООО «Информаналитика» (Россия) позволяет выпускать удовлетворяющие требованиям отечественных нормативных документов газоанализаторы для измерения концентрации всех представленных ВГ в воздухе рабочей зоны. Из зарубежных АС ВГ с ПДК < 1 ppm в настоящее время только сенсор HCN/S-100 для измерения циановодорода, а также сенсоры 4ND CityCel и ME4-NO₂ для измерения диоксида азота можно использовать в составе газоанализаторов в строгом соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.005-88 и ГОСТ 13320-81. При использовании в газоанализаторах зарубежных сенсоров других типов предел допустимого значения $t_{0,9} = 30$ с может быть превышен в 2–7 раз. Для токсичных газов HCl, CO, H₂S, SO₂, NH₃ с ПДК > 1 ppm АС ВГ производства всех представленных зарубежных фирм могут быть рекомендованы для применения в газоанализаторах при эксплуатации в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.005-88 и ГОСТ 13320-81. В то же время при использовании в газоанализаторе сенсоров хлористого водорода Sencoric HCl 3E 300 и HCl-D4 предел допустимого значения $t_{0,9}$ может быть превышен в 2,3 и 1,7 раза соответственно, а разрешение сенсоров HCl/C-200 может превысить значение $R_{\max}$ в 1,2 раза. Поэтому газоанализаторы с указанными сенсорами могут не выдержать испытаний в целях утверждения типа средства измерений.

Из табл. 2 также следует, что большинство зарубежных сенсоров не могут работать при температурах ниже –20...–30 °С, т. е. согласно ГОСТ 15150-69 газоанализаторы с такими сенсорами не соответствуют категории климатического исполнения «У». Это значительно сужает область применения таких сенсоров в России.

Таким образом, пользователям и разработчикам газоанализаторов ВГ при выборе зарубежного АС следует обращать внимание не только на температурный диапазон работы и быстродействие, но и на разрешение, поскольку оно связано с такой метрологической характеристикой, как пределы допустимой погрешности газоанализатора $A_{\max}$. Вероятной причиной того, что заявленные характеристики АС таких ВГ, как O₃, Cl₂, HCN, HF, HCl большинства ведущих мировых производителей не позволяют применять эти сенсоры в газоанализаторах, удовлетворяющих жестким требованиям российских нормативных документов, является как недостаточное знание этих документов, так и отсутствие информации о ПДК России в международном банке данных предельно допустимых концентраций. Согласно выражению (1) такие данные являются основой для выработки метрологических требований к газоанализаторам.

Заключение. Во многих странах предельно допустимые концентрации O₃, Cl₂, HF, HCN, NO₂, HCl, CO, H₂S, NH₃ превышают принятые в России ПДК. Кроме того, быстродействие газоанализаторов для измерения концентрации в России наиболее опасных ВГ должно соответствовать условию $t_{0,9} < 30$ с. Поэтому разрешение и (или) быстродействие АС многих ведущих зарубежных производителей не позволяют создавать газоанализаторы, удовлетворяющие жестким требованиям ГОСТ 12.1.005-88, ГОСТ 13320-81 и Постановления правительства РФ от 16.11.2020 г. № 1847 к пределам допускаемой погрешности и (или) быстродействию. Кроме того, большинство зарубежных АС ВГ работают при температуре не ниже –20 °С, а также отсутствуют сенсоры, работающие при $RH = 95...100$ %. В ООО «Информаналитика» на протяжении ряда лет разрабатываются АС, применение которых в газоанализаторах ВГ позволило в настоящее время выпускать широкий ассортимент приборов с характеристиками, удовлетворяющими требованиям указанных стандартов. При этом данные приборы работают при повышенной влажности $RH = 95...100$ % и в широком диапазоне температуры окружающего воздуха –40...+50 °С.

Список литературы

1. Rene Knake, Patrick Jacquinet, Alexia W. E. Hodson, Peter C. Hauser, *Analitica Chimica Acta*, 2005, vol. 549, no. 1-2, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.06.007>
2. Stetter J. R., Li J., *Chem. Rev.*, 2008, vol. 108, pp. 352–366. <https://doi.org/10.1021/cr0681039>
3. Gary W. Hunter, Sheikh Akbar, Shekhar Bhansali et al., *Journal of The Electrochemical Society*, 2020, vol. 167, 037570. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab729c>

4. Gatty H. K., Leijonmarck S., Antelius M. et al., *Sensor and Actuators B-Chemical*, 2015, vol. 209, pp. 639–644. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.11.147>

5. Zajda J., Schmidt N. J., Zheng Z. et al., *Electroanalysis*, 2018, vol. 30, no. 8, pp. 1602–1607. <https://doi.org/10.1002/elan.201800140>

6. Ronan Baron, John Saffell, *ACS Sensors*, 2017, vol. 2, no. 11, pp. 1553–1566. <https://doi.org/10.1021/acssensors.7b00620>

7. Angela Mihaeva Baracu, Livia Alexandra Dinu Gugoasa, *Journal of The Electrochemical Society*, 2021, vol. 168, no. 3, 037503. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abe8b6>

8. Gebicki J., Chachulski B., *Sensor and Actuators B: Chemical*, 2009, vol. 141, no. 1, pp. 249–255. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.06.024>

9. Anirban Paul, Sriram Muthukumar, Shalini Prasad, *Journal of The Electrochemical Society*, 2020, vol. 167, no. 3, 037511. <https://doi.org/10.1149/2.0112003JES>

10. Паранин А. Д., Тележко В. М., Тютчев М. В., Хойна Е. В. Электрохимический сенсор для контроля концентрации HCN в воздухе рабочей зоны // Датчики и системы. 2016. № 12. С. 49–54.

References

1. Rene Knake, Patrick Jacquinet, Alexia W. E. Hodson, Peter C. Hauser, *Analitica Chimica Acta*, 2005, vol. 549, no. 1-2, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.06.007>

2. Stetter J. R., Li J., *Chem. Rev.*, 2008, vol. 108, pp. 352–366. <https://doi.org/10.1021/cr0681039>

3. Gary W. Hunter, Sheikh Akbar, Shekhar Bhansali et al., *Journal of The Electrochemical Society*, 2020, vol. 167, 037570. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab729c>

4. Gatty H. K., Leijonmarck S., Antelius M. et al., *Sensor and Actuators B-Chemical*, 2015, vol. 209, pp. 639–644. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.11.147>

5. Zajda J., Schmidt N. J., Zheng Z. et al., *Electroanalysis*, 2018, vol. 30, no. 8, pp. 1602–1607. <https://doi.org/10.1002/elan.201800140>

6. Ronan Baron, John Saffell, *ACS Sensors*, 2017, vol. 2, no. 11, pp. 1553–1566. <https://doi.org/10.1021/acssensors.7b00620>

7. Angela Mihaeva Baracu, Livia Alexandra Dinu Gugoasa, *Journal of The Electrochemical Society*, 2021, vol. 168, no. 3, 037503. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abe8b6>

8. Gebicki J., Chachulski B., *Sensor and Actuators B: Chemical*, 2009, vol. 141, no. 1, pp. 249–255. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.06.024>

9. Anirban Paul, Sriram Muthukumar, Shalini Prasad, *Journal of The Electrochemical Society*, 2020, vol. 167, no. 3, 037511. <https://doi.org/10.1149/2.0112003JES>

10. Parani A. D., Telezhko V. M., Tyutchev M. V., Khoyna E. V., Electrochemical sensor for control hydrogen cyanide concentration in air of a working zone, *Sensors and Systems*, 2016, no. 12, pp. 49–54. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 11.03.2021; одобрена после рецензирования 24.05.2021; принята к публикации 31.05.2021.
The article was submitted 11.01.2021; approved after reviewing 24.05.2021; accepted for publication 31.05.2021.

Измерения для здоровья



ПОДПИСКА – 2022

- на ежемесячный научно-технический журнал
«Измерительная техника»
(печатное издание и электронная копия)
- на журнал «Метрология»
(периодичность выхода 4 раза в год)
- ▶ онлайн на сайтах подписных агентств
- ▶ в редакции

Подписка через Интернет

ГК «Урал-Пресс»

«Измерительная техника»	«Метрология»
38168 (печатное издание)	013316
013315 (электронная копия)	(электронная копия)

www.ural-press.ru

☎ +7 (495) 789-86-36; +7 (499) 700-05-07

Агентство по распространению зарубежных изданий

www.arzi.ru

☎ +7 (495) 680-89-87; +7 (495) 631-62-55

✉ secret@arzi.ru

Агентство «Книга-Сервис»

- интернет-каталог «Пресса по подписке» www.akc.ru
- объединённый каталог «Пресса России» www.pressa-rf.ru

☎ +7 (495) 631-62-54

✉ podpiska@pressa-rf.ru

Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU www.elibrary.ru

Электронно-библиотечная система «РУКОНТ» www.lib.rucont.ru

Подписка в редакции
на номера текущего года и архивные номера 2016–2020 гг.

- ▶ по телефону +7 (495) 430-28-02
- ▶ по электронной почте kersova@vniims.ru
- ▶ на сайтах www.vniims.ru, www.izmt.ru

Адрес редакции:

119361 Москва, ул. Озёрная, 46, ФГУП «ВНИИМС»

☎ +7 (495) 781-48-70

✉ izmt@vniims.ru

www.izmt.ru