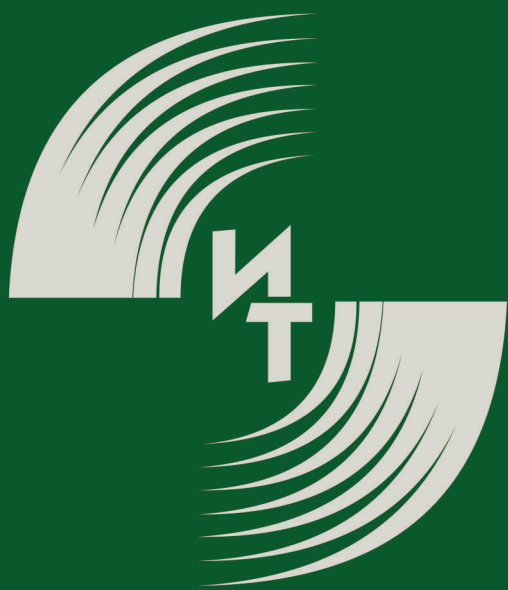




**ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА
2022
№12**



Дорогие читатели, авторы, коллеги, друзья!

Поздравляем вас с Новым 2023 годом и Рождеством!

Пусть 2023 год подарит спокойствие и радостные события, будет полон счастливых моментов, принесёт в ваши дома свет, добро, любовь и удачу. Желаем вам крепкого здоровья и мира в душе, тёплых семейных вечеров и взаимопонимания!

Благодарим вас за выбор журнала «Измерительная техника» в качестве источника информации о новейших научных исследованиях и достижениях в области метрологии и обеспечения единства измерений. Пусть наступающий год станет годом совместных усилий и творческих побед, и наш деловой союз будет основан на взаимоуважении и доверии.

Коллектив редакции и редколлегии журнала «Измерительная техника»

В 2023 году мы продолжим публиковать на печатных и электронных страницах научно-технического журнала «Измерительная техника» научные статьи по фундаментальным и прикладным исследованиям в области метрологии с целью поддержания интереса читателей к оригинальным и инновационным подходам в области обеспечения единства измерений во всех сферах науки, техники и производства.

Научно-технический журнал «Измерительная техника»

для учёных, студентов и профессорско-преподавательского состава вузов, соискателей грантов и учёных степеней кандидатов и докторов наук, а также для специалистов-метрологов, занимающихся проблемами метрологии и разработкой, созданием средств измерений и методик измерений

- ✓ Основан в 1939 г.
- ✓ 12 номеров в год
- ✓ Публикации для авторов бесплатны
- ✓ Учредители – Росстандарт, Метрологическая академия и ведущие национальные метрологические институты
- ✓ Актуальная информация о государственных первичных эталонах и результатах научных исследований в области метрологии и обеспечения единства измерений
- ✓ Высокий научный уровень рецензируемого издания
- ✓ Признание в международных метрологических организациях, таких как МБМВ, МОЗМ и др.
- ✓ С 1958 г. имеет переводную версию – журнал «Measurement Techniques», который издаёт и распространяет по всему миру издательство Springer Nature
- ✓ Индексация научных статей в ключевых российских и международных реферативных базах данных, таких как Scopus, Emerging Sources Citation Index (ESCI), ПИНЦ, Russian Science Citation Index (RSCI), ВАК, «Белый список» РЦНИ и др.

ПОДПИСКА – 2023

на печатную версию и электронную копию

- Каталог «Пресса России» (ООО «Книга-сервис»)
- Подписные агентства:
 - ООО «УП Урал-Пресс»,
 - ООО «Книга-сервис»,
 - Агентство по распространению зарубежных изданий (ОАО «АРЗИ»)
- Интернет-каталог «Пресса по подписке»
<http://www.akc.ru>
- Электронно-библиотечная система «РУКОНТ»
<https://lib.rucont.ru/search>
- Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU
www.elibrary.ru
- Подписка в редакции по тел. +7 (495) 430-28-02 и на сайте www.vniims.ru



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2022 № 12 декабрь

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

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»

ФГБУ «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической
службы»

МОО «Метрологическая академия»

СОДЕРЖАНИЕ

■ ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЭТАЛОНЫ

- В. И. Адерихин, И. М. Малай, М. С. Маркова, М. В. Саргсян, М. И. Фартушин.** Государственный первичный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц ГЭТ 21-2021 3

■ ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

- А. П. Чирков.** Национальная система измерений и национальная метрологическая инфраструктура: анализ документов D1 Международной организации законодательной метрологии 10
- А. Н. Баженов, А. Ю. Тельнова.** Обобщение коэффициента Жаккара для анализа данных с интервальной неопределённостью 15
- И. А. Кулешов.** Регуляризация задачи контроля состояний групповых объектов лётных испытаний 23

■ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ

- Е. В. Матвеев, В. В. Берестов.** Разработка и апробация методики непрерывного измерения массы образцов диэлектрических материалов при микроволновой термообработке 30

■ ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. И. Юрин, Г. Н. Вишняков, В. Л. Минаев.** Измерение показателя преломления с помощью модифицированного метода постоянного отклонения 35
- В. А. Небаевский, Р. С. Стариков.** Оценка эффективности применения высокоразрешающих анализаторов оптического спектра для характеристики аналоговых оптических трактов с внешней модуляцией 40

■ МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- М. В. Жаров.** Измерительно-управляющая система термокомпрессионного оборудования с регламентированными температурно-скоростными параметрами деформирования 46

■ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Т. З. Насиров, Х. Ш. Жабборов.** Методика коррекции температурной погрешности преобразователя влажности с цилиндрическим электродом 52

■ АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. Е. Исаяев, Б. И. Хатамтаев.** Эквивалентный размер и акустический центр измерительного гидрофона 58

■ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Д. В. Аверкин.** Синтез мер размера частиц на основе водных суспензий полистирольных латексных сфер 64

Перечень статей, опубликованных в 2022 г. 69

Алфавитный указатель – 2022 75



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Izmeritel'naya Tekhnika

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

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

Сдано в набор: 23.11.2022.
Подписано в печать: 27.12.2022.
Формат 60х90 1/8. Бумага мелованная. Печать офсетная.
Усл. п.л. 9,5. Уч.-изд. л. 11,8. Тир. 200 экз. Зак. 22-25м.
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: ФГБУ «ВНИИМС».
Адрес редакции и издателя: 119361, Москва,
ул. Озёрная, 46, ФГБУ «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.

CONTENTS

■ STATE STANDARDS

- V. I. Aderikhin, I. M. Malay, M. S. Markova, M. V. Sargsyan, M. I. Fartushin.**
*State primary standard of the unit of power spectral density of noise radio emission
in the frequency range from 0.002 to 178.3 GHz GET 21-2021* 3

■ GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

- A. P. Chirkov.** *National measurement system and national metrological infrastructure:
analysis of documents D1 of the International Organization of Legal Metrology* 10
- A. N. Bazhenov, A. Yu. Telnova.** *Generalization of Jaccard index for interval data
analysis* 15
- I. A. Kuleshov.** *Regularization of the problem of monitoring the states of group objects
of flight test* 23

■ MASS MEASUREMENTS

- E. V. Matveev, V. V. Berestov.** *Development and testing of a method for continuous mass
measurement dielectric materials samples during microwave heat treatment* 30

■ OPTICOPHYSICAL MEASUREMENTS

- A. I. Yurin, G. N. Vishnyakov, V. L. Minaev.** *Measurement of the refractive index using
a modified constant deviation method* 35
- V. A. Nebavskiy, R. S. Starikov.** *Testing high-resolution optical spectrum analyzers
for characterization analog optical links with external modulation* 40

■ MECHANICAL MEASUREMENTS

- M. V. Zharov.** *Measuring and control system of thermocompression equipment with
regulated temperature and speed parameters of deformation* 46

■ ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

- T. Z. Nasirov, Kh. Sh. Jabborov.** *The correction scheme of temperature errors in
the moisture meter transformer with cylindrical electrodes* 52

■ ACOUSTIC MEASUREMENTS

- A. E. Isaev, B. I. Khatamtaev.** *Equivalent size and acoustic center of measuring
hydrophone* 58

■ PHYSICOCHEMICAL MEASUREMENTS

- D. V. Averkin.** *Synthesis of standard reference materials of particle size in liquid
medium based on aqueous suspensions of polystyrene latex spheres* 64

Tables of content 2022 69

Author index number 2022 75



Государственный первичный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц ГЭТ 21-2021

Владимир Ильич Адери́хин¹, Иван Михайлович Малай², Мария Сергеевна Маркова^{3✉}, Мелик Вардкесович Саргсян⁴, Максим Игоревич Фартушин⁵

1, 2, 3, 4, 5 Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

¹avi@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3313-3945>

²malay@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3148-7336>

³markova_ms@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3367-3442>

⁴mcrmi121@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3849-7740>

⁵fartushin@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7311-2041>

Аннотация. В 2021 г. утверждён Государственный первичный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц ГЭТ 21-2021. В качестве первичных эталонных мер в состав ГЭТ 21-2021 введены низкотемпературные генераторы шума. Исследованы спроектированные и изготовленные первичные эталонные меры: два коаксиальных низкотемпературных генератора шума в диапазонах частот 0,002–4,0 ГГц, 4,0–12,05 ГГц и три волноводных низкотемпературных генераторов шума в диапазонах частот 12,05–17,44 ГГц, 17,44–25,86 ГГц, 25,86–37,5 ГГц. Исследованы и рассчитаны эквивалентные шумовые температуры первичных эталонных мер. Воспроизводимое значение эквивалентной шумовой температуры для коаксиальных низкотемпературных генераторов шума составило 77,5–84,82 К и волноводных низкотемпературных генераторов шума – 78,4–80,53 К. Разработаны и изготовлены компараторы – приёмники шумового сигнала в пяти диапазонах: в двух коаксиальных трактах 0,002–4,0 ГГц и 4,0–12,05 ГГц; в трёх волноводных трактах 12,05–17,44 ГГц; 17,44–25,86 ГГц и 25,86–37,5 ГГц. Увеличен динамический диапазон измерений и уменьшена погрешность передачи единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения. Суммарная погрешность воспроизведения единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения составила 0,24–0,30 К, расширенная неопределённость передачи единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения вторичным эталонам и рабочим эталонам 1-го разряда – 0,4–0,8 К, погрешность измерений спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения уменьшилась в 1,5 раза. Проведён сравнительный анализ неопределённостей при передаче единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения от первичных эталонных мер вторичным эталонам и рабочим эталонам 1-го разряда.

Результаты данной работы применимы в радиопромышленности при измерении шумовых параметров. Значения чувствительности приборов и устройств, работа которых зависит от уровня шумовых электромагнитных колебаний, контролируются мерами спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения – измерительными генераторами шума.

Ключевые слова: эталон, спектральная плотность мощности шумового радиоизлучения, эквивалентная шумовая температура

Для цитирования: Адери́хин В. И., Малай И. М., Маркова М. С., Саргсян М. В., Фартушин М. И. Государственный первичный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц ГЭТ 21-2021 // Измерительная техника. 2022. № 12. С. 3–9. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-3-9>

State primary standard of the unit of power spectral density of noise radio emission in the frequency range from 0.002 to 178.3 GHz GET 21-2021

Vladimir I. Aderikhin¹, Ivan M. Malay², Mariya S. Markova^{3✉}, Melik V. Sargsyan⁴, Maksim I. Fartushin⁵

1, 2, 3, 4, 5 Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleev, Moscow region, Russia

¹avi@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3313-3945>

²malay@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3148-7336>

³markova_ms@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3367-3442>

⁴mcrmi121@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3849-7740>

⁵fartushin@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7311-2041>

Abstract. In 2021, the State primary standard unit of power spectral density of noise radio emission in the frequency range from 0.002 to 178.3 GHz GET 21-2021 passed the approval. GET 21-2021 introduced low-temperature noise generators as primary reference measures. Preferred and manufactured primary reference measures were investigated: two coaxial low temperature noise generators in the frequency range 0.002–4.0 GHz, 4.0–12.05 GHz and three waveguide low temperature noise generators in the frequency range 12.05–17.44 GHz, 17.44–25.86 GHz, 25.86–37.5 GHz. Noise temperatures of primary reference measures are investigated and calculated. The reproducible value of the equivalent noise temperature was 77.5–84.82 K for coaxial low-temperature noise generators and 78.4–80.53 K for waveguide low-temperature noise generators, 4.0 GHz and 4.0–12.05 GHz; three waveguide 12.05–17.44 GHz; 17.44–25.86 GHz and 25.86–37.5 GHz. The dynamic range of measurements is increased and the error of unit transmission is reduced. The results of measurements of the power spectral density of noise radio emission with the following characteristics are obtained: the total error in reproducing the unit of the spectral power density of noise radio emission from 0.24 to 0.30 K; expanded uncertainty when transferring a unit of power spectral density of noise radio emission to secondary standards and working standards of the 1st category, from 0.4 to 0.8 K; the measurement error of the power spectral density of noise radio emission decreased by 1.5 times. A comparative analysis of uncertainties in the transfer of a unit of the power spectral density of noise radio emission from primary reference measures to secondary standards and working standards of the 1st category is carried out.

The results of this work are applicable in the radio industry when measuring noise parameters. The sensitivity values of instruments and devices that depend on the level of noise electromagnetic oscillations, are controlled by measures of the power spectral density of noise radio emission – measuring noise generators.

Keywords: standard, spectral density of noise radiation power, equivalent noise temperature

Введение. Радиоприёмные устройства, применяемые в телевидении, системах радиосвязи, радионавигации, радиолокации, а также полупроводниковая электроника, радиоастрономия диктуют требования к технике измерений параметров мощности шума радиочастотного излучения – некогерентного излучения в широком спектральном диапазоне – и к соответствующим эталонам, обеспечивающим единство измерений параметров этого вида излучения.

В настоящее время большинство средств измерений параметров мощности шума радиочастотного излучения (полупроводниковые генераторы шума и измерители коэффициента шума) работают в диапазоне частот 0,01–37,5 ГГц. Характеристики Государственного первичного эталона единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения ГЭТ 21-2011 в данном частотном диапазоне не соответствовали возросшим требованиям указанных выше отраслей. Возникла необходимость усовершенствования ГЭТ 21-2011 с целью повышения эффективности проводимых поверочных и калибровочных работ, уменьшения погрешности передачи единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения (СПМШ), а также улучшения параметров компаратора шумовых сигналов.

Чувствительность радиоустройств и их компонентов контролируется мерами СПМШ – измерительными генераторами шума [1]. Основные объекты поверки в области шумового излучения в радиодиапазоне – измерительные приёмники и радиометры, а также источники (меры) радиошума – тепловые источники [2], газоразрядные и диодные генераторы шума.

Цель исследования – улучшение точности воспроизведения единицы СПМШ в диапазоне частот 0,002–37,5 ГГц.

История создания эталона. Работы по обеспечению единства измерений слабых шумовых сигналов начались во ВНИИФТРИ в 1957 г. Результатом этих работ стало создание

в период 1971–1976 гг. трёх государственных эталонов: первичного эталона в диапазоне частот 1,04–37,5 ГГц, а также двух специальных эталонов единицы СПМШ в диапазонах частот 125–1000 МГц и 2–125 МГц. В 1981 г. три эталона были объединены в один эталонный комплекс в диапазоне частот 0,002–37,5 ГГц. В дальнейшем работы по совершенствованию эталона СПМШ были связаны с расширением частотного диапазона до 178,3 ГГц. В 1991 г. в состав эталона СПМШ включена образцовая установка для поверки низкотемпературных генераторов шума (НГШ), работающая в диапазоне частот 37,5–178,3 ГГц.

В настоящее время Государственный первичный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц ГЭТ 21-2021¹ состоит из следующих технических средств, вспомогательных устройств и специальных инженерных сооружений:

тепловых НГШ в волноводных трактах сечениями 23×10; 16×8; 11×5,5; 7,2×3,4; 5,2×2,6; 3,6×1,8; 2,4×1,2; 1,6×0,8 мм и в коаксиальных трактах 7/3,04; 3,5/1,52 мм;

компарирующих установок в волноводных трактах ЭУ 12,05–17,44 ГГц, ЭУ 17,44–25,95 ГГц, ЭУ 25,95–37,5 ГГц, ЭУ 37,5–53,57 ГГц, ЭУ 53,57–78,33 ГГц, ЭУ 78,33–118,1 ГГц, ЭУ 118,1–178,3 ГГц и в коаксиальных трактах ЭУ 0,002–0,2 ГГц, ЭУ 0,2–1,0 ГГц, ЭУ 1,0–12,1 ГГц, ЭУ 1–26,5 ГГц;

вспомогательных средств измерений и оборудования, необходимых для контроля стабильности работы эталона при передаче единицы СПМШ.

Первичная эталонная мера единицы СПМШ. Основная составляющая часть ГЭТ 21-2021 – первичные тепловые НГШ (эталонные меры единицы СПМШ). Эталон воспроизводит единицу СПМШ на основе формулы Планка, применение которой в идеальном случае изотермической системы, состоящей из излучателя на основе абсолютно чёрного тела, нагруженного на бесконечную (или неотражающую)

¹ Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 2 февраля 2021 г. № 67 «Об утверждении Государственного первичного эталона единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц».

одномоновую линию передачи, даёт выражение для расчёта СПМШ [3]:

$$G = hf / (e^{hf/(kT)} - 1), \quad (1)$$

где $h = 6,6261 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; f – частота излучения; $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹ – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура излучателя [4, 5].

Диапазон воспроизведения единицы СПМШ G на аппаратуре ГЭТ 21-2021 составляет $1,07 \cdot 10^{-21}$ – $1,17 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц. На практике расчёты с малыми величинами G , например $1,07 \cdot 10^{-21}$, не используют из-за сложности вычислений, поэтому измерительные генераторы шума с достаточно гладким частотным спектром характеризуют эквивалентной шумовой температурой (ЭШТ) в кельвинах. ЭШТ получают при разложении экспоненциального члена в знаменателе формулы (1) в ряд при учёте первых двух или трёх членов ряда:

$$G_1 = kT; \quad (2)$$

$$G_2 = kT(1 - hf/(kT)). \quad (3)$$

Так как G_1 , G_2 вычисляются по приближённым формулам (2), (3), то для оценок их относительных погрешностей δG_1 , δG_2 используем следующие выражения:

$$\delta G_1 = hf/(2kT); \quad \delta G_2 = -\frac{1}{12} \left(\frac{hf}{2kT} \right)^2.$$

Расчёты по формуле Релея-Джинса (2) при температуре 77,4 К дают погрешность не более 0,1 % лишь на частотах ниже 3 ГГц, поэтому для частот выше 3 ГГц применяется формула (3), обеспечивающая такую же погрешность вплоть до 180 ГГц.

В качестве первичной эталонной меры СПМШ используются НГШ в коаксиальных и волноводных трактах (рис. 1). НГШ представляет собой криостат, состоящий из корпуса 2, крышки 1, теплоизоляции 3 и стакана для азота 4. Излучатель представляет собой согласованную нагрузку 6, охлаждаемую до температуры кипения жидкого азота ($T_{\text{и}} = 77,4$ К), с теплоразвязывающей коаксиальной или волноводной линией 7. Коаксиальная (волноводная) линия заканчивается выходным разъёмом (фланцем) 8 и радиатором 9. Основание 10 криостата снабжено регулируемыми винтами.

В изотермической системе ЭШТ $T_{\text{ЭШТ}}$ совпадает с физической температурой излучателя $T_{\text{и}}$. НГШ не является изотермической системой, так как температура его выходной линии передачи изменяется по всей длине от температуры излучателя $T_{\text{и}}$ до температуры T_0 на конце линии, близкой к комнатной температуре (рис. 2, кривая $T(z)$). При аттестации

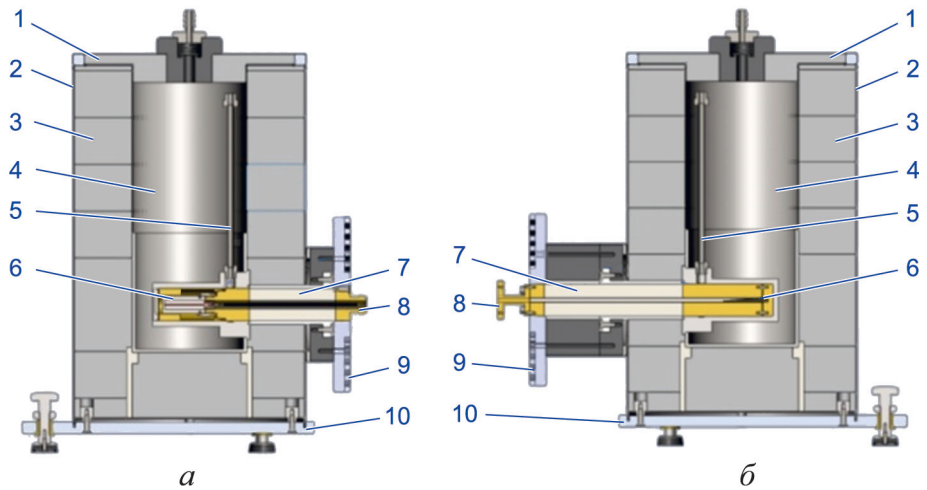


Рис. 1. Коаксиальный (а) и волноводный (б) низкотемпературные генераторы шума: 1 – крышка; 2 – корпус криостата; 3 – теплоизоляция; 4 – стакан для азота; 5 – трубка подачи паров азота в теплоизолирующую коаксиальную (волноводную) линию; 6 – согласованная нагрузка теплоразвязывающей коаксиальной (волноводной) линии; 7 – теплоразвязывающая коаксиальная (волноводная) линия; 8 – выходной разъём (фланец); 9 – радиатор теплоразвязывающей коаксиальной (волноводной) линии; 10 – основание с регулируемыми винтами

Fig.1. Heat-insulating coaxial (a) and waveguide (b) low temperature noise generators: 1 – cover; 2 – cryostat case; 3 – thermal insulation; 4 – glass for nitrogen; 5 – a tube for supplying nitrogen vapor to a heat-insulating coaxial (waveguide) line (HICL, HIWL); 6 – broadband load HICL, HIWL; 7 – HICL (HIWL); 8 – output connector (flange); 9 – radiator HICL, HIWL; 10 – base with adjusting screws

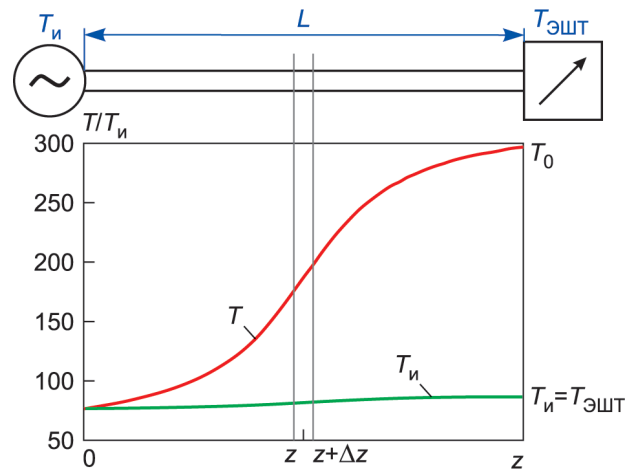


Рис. 2. Принцип воспроизведения единицы СПМШ

Fig. 2. The principle of reproduction of the unit spectral density of noise radiation power

НГШ определяется добавка $\Delta T_{\text{и}}$ к $T_{\text{и}}$, обусловленная излучением стенок или проводников выходной линии, зависящая от вида кривой $T(z)$ и потерь в линии. Примерный вид зависимости результирующей ЭШТ в линии от координаты z , полученный расчётным способом, показывает, что кривая $T_{\text{и}}(z)$ проходит существенно ниже кривой $T(z)$ [6].

Задача воспроизведения и передачи единицы СПМШ с наивысшей точностью в коаксиальной линии сечением

7/3,04 мм и волноводах сечениями 16×8; 11,0×5,5; 7,2×3,4 мм решена в результате разработки эталонных установок с поддиапазонами частот: 0,002–0,2; 0,2–1,0; 1,0–12,1; 12,05–17,44; 17,44–25,95 и 25,95–37,5 ГГц. Эталонные установки состоят из 5 первичных эталонных мер и 13 компараторов, перекрывающих диапазон частот 0,002–37,5 ГГц.

Под воспроизведением единицы СПМШ понимается совокупность операций и косвенных измерений, в результате которых определяется значение СПМШ (или единицы ЭШТ – кельвина) на выходе первичной эталонной меры. Воспроизведение единицы СПМШ (ЭШТ) для всех первичных эталонных мер основано на измерениях, выполняемых как при аттестации эталона, так и непосредственно при воспроизведении единицы [1, 3]. Для определения единицы СПМШ необходимо выполнить следующие процедуры:

измерить ослабление, вносимое теплоразвязывающей линией передачи при комнатной температуре;

измерить температуры излучателя $T_{\text{и}}$ и выходного соединителя первичной эталонной меры при комнатной температуре T_0 ;

определить распределение температуры $T(z)$ вдоль теплоразвязывающей линии передачи первичной эталонной меры;

рассчитать ЭШТ $T_{\text{ЭШТ}}$ и её погрешности на выходе первичной эталонной меры;

передать с помощью компараторов единицу СПМШ (ЭШТ) от первичной эталонной меры рабочим эталонам и средствам измерений.

Методика расчёта ЭШТ приведена в [1, 2]. Теплоразвязывающая коаксиальная или волноводная линия НГШ

разбивается на короткие отрезки Δz . Шумовая температура на выходе k -го отрезка вычисляется по формуле

$$T_{k+1} = T_k + 0,23\alpha_k \Delta z_k (T_{\Delta k} - T_k), \quad (4)$$

где T_k – шумовая температура на входе k -го отрезка волновода; $T_{\Delta k}$ – средняя физическая температура отрезка; Δz_k – длина отрезка; $\alpha_k = \alpha_{T_0} \sqrt{1 - \gamma(T_0 - T_{\Delta k})}$ – постоянная затухания k -го отрезка при температуре $T_{\Delta k}$, α_{T_0} – постоянная затухания при комнатной температуре T_0 , γ – температурный коэффициент удельного электрического сопротивления внутренней поверхности волновода.

Выходная шумовая температура НГШ $T_{\text{ЭШТ}}$ определяется в результате последовательного расчёта T_{k+1} по формуле (4) для каждого отрезка Δz_k волновода. На рис. 2 приведены типовые характеристики распределения температуры вдоль теплоизолирующей линии длиной L .

Расчёт ЭШТ НГШ производится в широком диапазоне частот для различных стандартизованных типов линии передачи высокой и сверхвысокой частот, что вызывает необходимость применения набора из пяти первичных эталонных мер (ПЭМ) (табл. 1), каждая из которых перекрывает часть частотного диапазона: два коаксиальных НГШ (обозначение К); три волноводных НГШ (обозначение В).

Диапазон значений ЭШТ НГШ 77,5–84,8 К. Характеристики ПЭМ по типам трактов приведены в табл. 1, где $T_{\text{ЭШТ}}$ – воспроизводимое значение ЭШТ.

Оценка погрешностей. Расчётно-экспериментальными методами получены следующие составляющие неисключённой систематической погрешности (НСП) воспроизведения единицы СПМШ [8]: погрешность измерения температуры вдоль коаксиальной или волноводной линии НГШ Θ_{01} ; погрешность распределения температуры вдоль коаксиальной или волноводной линии НГШ Θ_{02} ; погрешность измерения потерь в коаксиальной или волноводной линии НГШ Θ_{03} ; погрешность из-за теплового коэффициента сопротивления Θ_{04} ; погрешность измерения потерь в короткой волноводной линии НГШ Θ_{05} .

Также определены случайные погрешности измерения потерь в коаксиальной или волноводной линии НГШ S_{01} и во внешнем волноводном отрезке с выходным фланцем S_{02} , результирующая погрешность воспроизведения ЭШТ Θ .

Полученные значения составляющих НСП для коаксиальных и волноводных НГШ и значения НСП ГЭТ 21-2021 приведены в табл. 2, 3 соответственно.

Бюджет неопределённости результатов измерений приведён в табл. 4, где u_A – стандартная неопределённость типа А, u_B – стандартная неопределённость типа В, U_c – суммарная стандартная неопределённость, U_p – расширенная неопределённость, k – коэффициент охвата.

Эталонный компаратор. Устройство, принцип работы.

Эталонные компараторы предназначены для передачи единицы СПМШ от первичной эталонной меры вторичным эталонам и рабочим эталонам 1-го разряда методом сравнения путём поочередного подсоединения объектов измерения к входу компаратора. При этом компаратор представляет

Таблица 1

Характеристики комплекта первичных эталонных мер

ПЭМ	Диапазон частот, ГГц	Сечение коаксиала / волновода, мм	$T_{\text{ЭШТ}}$, К
К7-4	0,002–4,0	К-7/3,04	77,50–83,90
К7-18	4,0–18,0	К-7/3,04	80,73–84,82
В16×8	12,05–17,44	В-16×8 (WR-62)	79,18–78,43
В11×5,5	17,44–25,86	В-11×5,5 (WR-42)	78,75–78,07
В7,2×3,4	25,86–37,5	В-7,2×3,4 (WR-28)	80,53–80,19

Таблица 2

Составляющие погрешности измерений при воспроизведении единицы СПМШ (ЭШТ), К, коаксиальными НГШ

Составляющие погрешности	Оценка на частоте, ГГц	
	0,002–4,0	4,0–18,0
Θ_{01} , К	0,03	0,03
Θ_{02} , К	0,02	0,02
Θ_{03} , К	0,12	0,12
Θ_{04} , К	0,01	0,01
S_{01} , К	0,04	0,05
Θ , К	0,24	0,27

собой модуляционный супергетеродинный приёмник радиометрического типа, функционально и конструктивно разделяющийся на сверхвысокочастотный (или высокочастотный) тракт и систему индикации.

Каждый сверхвысокочастотный (или высокочастотный) тракт обеспечивает:

в диапазоне частот 0,002–0,225 ГГц введение коэффициента рассогласования в результате измерения комплексных коэффициентов отражения выходного разъёма первичной эталонной меры, вторичных эталонов, рабочих эталонов 1-го разряда и входа тракта приёмника;

в диапазоне частот 0,225–37,5 ГГц согласование между выходами первичных эталонных мер, вторичных эталонов, рабочих эталонов 1-го разряда и входом приёмника с помощью трансформатора полных сопротивлений;

введение модулированного опорного сигнала (пилот-сигнала);

частотную селекцию и предварительное усиление входных сигналов маломушумящим усилителем.

Уравнение передачи единицы ЭШТ имеет вид

$$T_{ВЭ} = (T_{ПЭМ} - T_0)nQ + T_0,$$

где $T_{ПЭМ}$, $T_{ВЭ}$, T_0 – шумовые температуры первичной эталонной меры, вторичных эталонов и согласованной нагрузки при комнатной температуре; n – измеренное на выходе компаратора отношение $(T_{ВЭ} - T_0)/(T_0 - T_{ПЭМ})$, соответствующее поочередным подсоединениям к входу компаратора первичной эталонной меры, вторичных эталонов и согласованной нагрузки; Q – поправочный коэффициент, учитывающий значения комплексных коэффициентов отражения $\Gamma_{ПЭМ}$, $\Gamma_{ВЭ}$, $\Gamma_{ВХ}$ первичной эталонной меры, вторичных эталонов и входа компаратора соответственно. Здесь

$$Q = \frac{1 - |\Gamma_{ВЭ}|^2}{1 - |\Gamma_{ПЭМ}|^2} \frac{|1 - \Gamma_{ПЭМ}\Gamma_{ВХ}|^2}{|1 - \Gamma_{ВЭ}\Gamma_{ВХ}|^2}.$$

Для передачи единицы СПМШ используется два метода: метод двух отсчётов или модуляционный метод.

Метод двух отсчётов предполагает прямое измерение СПМШ первичной эталонной меры $T_{ПЭМ}$, согласованной нагрузки при комнатной температуре T_0 и высокотемпературного генератора шума $T_{ВЭ}$. По результатам измерения $T_{ПЭМ}$, T_0 , $T_{ВЭ}$ рассчитывается отношение измерения Y -фактора.

При модуляции пилот-сигналом на вход компаратора через переходное ослабление направленного ответвителя поступает излучение от опорного генератора шума $\Delta T_{о.г.}$, работающего в импульсном режиме с частотой модуляции.

При подключении на вход измерительного тракта компаратора последовательно измеряются $Y_{ПЭМ}$, Y_0 , $Y_{ВЭ}$ первичной эталонной меры в виде НГШ, согласованной нагрузки при комнатной температуре и вторичной эталонной меры в виде высокотемпературного генератора шума. Значения $Y_{ПЭМ}$, Y_0 , $Y_{ВЭ}$ выражаются следующими отношениями:

Таблица 3
Составляющие погрешности измерений при воспроизведении единицы СПМШ (ЭШТ), К, волноводными НГШ

Составляющие погрешности	Оценка на частоте, ГГц (сечение волновода, мм)		
	12,5–17,0 (16×8)	18,0–25,0 (11×5,5)	26,0–37,5 (7,2×3,4)
Θ_{01}	0,03	0,03	0,03
Θ_{02}	0,01	0,01	0,01
Θ_{03}	0,08	0,09	0,09
Θ_{04}	0,01	0,01	0,01
Θ_{05}	0,08	0,09	0,095
S_{01}	0,04	0,04	0,04
S_{02}	0,04	0,04	0,04
Θ	0,29	0,30	0,30

Таблица 4
Неопределённости результатов измерений при воспроизведении единицы СПМШ (ЭШТ)

Диапазон частот, ГГц	Сечение, мм	u_A , К	u_B , К	u_C , К	U_p ($k=2$), К
0,002–1,000	K-7/3,04	0,09	0,12	0,15	0,30
1,00–8,15	K-7/3,04	0,09	0,12	0,15	0,30
8,15–12,42	K-7/3,04	0,09	0,12	0,15	0,30
12,05–17,44	B-16×8	0,1	0,07	0,12	0,24
17,44–25,86	B-11×5,5	0,1	0,08	0,13	0,26
25,86–37,50	B-7,2×3,4	0,1	0,11	0,15	0,30

$$Y_{ПЭМ} = (T_{ПЭМ} + T_{ВХ} + \Delta T_{о.г.}) / (T_{ПЭМ} + T_{ВХ}),$$

$$Y_0 = (T_0 + T_{ВХ} + \Delta T_{о.г.}) / (T_0 + T_{ВХ}),$$

$$Y_{ВЭ} = (T_{ВЭ} + T_{ВХ} + \Delta T_{о.г.}) / (T_{ВЭ} + T_{ВХ}),$$

где $T_{ВХ}$ – собственная ЭШТ измерительного тракта компаратора.

Таким образом, измеренное на выходе компаратора отношение n примет вид

$$n_M = \frac{T_{ВЭ} - T_0}{T_0 - T_{ПЭМ}} = \left(\frac{Y_0 - 1}{Y_{ВЭ} - 1} - 1 \right) \left(1 - \frac{Y_0 - 1}{Y_{ПЭМ} - 1} \right)^{-1}.$$

В уравнение передачи единицы СПМШ кроме отношения n входит поправочный коэффициент Q , учитывающий рассогласование комплексных коэффициентов отражения используемых при измерениях объектов. Перед измерением отношения n или непосредственно после необходимо измерить модуль и фазу комплексных коэффициентов отражения $\Gamma_{ПЭМ}$, $\Gamma_{ВЭ}$, $\Gamma_{ВХ}$ с использованием векторного анализатора цепей. С учетом измеренных модулей $\Gamma_{ПЭМ}$, $\Gamma_{ВЭ}$, $\Gamma_{ВХ}$ и фаз $\varphi_{ПЭМ}$, $\varphi_{ВЭ}$, $\varphi_{ВХ}$ формула поправочного коэффициента примет вид

$$Q = \frac{1 - |\Gamma_{ВЭ} e^{j\varphi_{ВЭ}}|^2}{1 - |\Gamma_{ПЭМ} e^{j\varphi_{ПЭМ}}|^2} \frac{|1 - \Gamma_{ПЭМ} e^{j\varphi_{ПЭМ}} \Gamma_{ВХ} e^{j\varphi_{ВХ}}|^2}{|1 - \Gamma_{ВЭ} e^{j\varphi_{ВЭ}} \Gamma_{ВХ} e^{j\varphi_{ВХ}}|^2}.$$

Таблица 5

Расширенная неопределённость передачи единицы СПМШ (коэффициент охвата $k=2$)

Национальный метрологический институт	Частота, ГГц				
	0,002	8,0	12,4	26,5	37,5
NPL, Великобритания	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0
NIST, США	1,0	1,5	2,0	1,0	1,6
ВНИИФТРИ, РФ (ГЭТ 21-2011)	0,7	1,0	1,1	1,3	1,5
ВНИИФТРИ, РФ (ГЭТ 21-2021)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8

Таблица 6

СКО и НСП при воспроизведении единицы СПМШ (ЭШТ), К

Диапазон частот, ГГц	СКО, К	НСП, К	НСП, %, в диапазоне ЭШТ	
			77,4–153,5 К	153,5–20000 К
0,002–12,05	0,04	0,2–0,3	0,3–0,4	0,5–0,7
1,00–26,50	0,10	0,1–0,3	0,2–0,7	0,3–0,7
12,05–37,50	0,06	0,3	0,5	0,8
37,50–53,57	0,60	0,6	1,4	1,5
53,57–78,33	0,50	0,7	2,0	1,9
78,33–118,10	0,70	1,0	2,0–3,0	1,8
118,1–178,3	0,70	1,0	3,0–4,0	2,2

Таким образом, погрешность передачи единицы СПМШ рабочим эталонам 1-го разряда формируется из следующих составляющих:

погрешности измерения коэффициентов отражения в полосе пропускания компаратора векторным анализатором цепей;

остаточного рассогласования после выравнивания коэффициентов отражения согласующим трансформатором сопротивлений;

вариации потерь в согласующих трансформаторах сопротивлений при выравнивании коэффициентов отражения сравниваемых объектов измерения – генераторов шума;

зависимости собственных шумов и уровня опорного сигнала компараторов от коэффициента отражения сравниваемых объектов генераторов шума;

разности потерь в соединителях сравниваемых генераторов шума;

влияния побочных каналов приёма;

нелинейности сквозной передаточной характеристики измерительных трактов компараторов и погрешность введения поправки на нелинейность;

погрешности отсчётных устройств;

погрешности измерения температуры «комнатной» согласованной нагрузки T_0 из-за погрешности термометра и тепловых переходных процессов;

случайной погрешности результатов измерений из-за неидеальности аппаратуры и внешних помех.

В табл. 5 приведено сравнение неопределённости измерений ГЭТ 21-2021 с лучшими зарубежными аналогами [8–14].

Из табл. 5 следует, что первичные эталонные генераторы шума из состава ГЭТ 21-2021 не уступают по неопределённости лучшим зарубежным аналогам в диапазоне частот 0,002–37,5 ГГц.

Метрологические характеристики ГЭТ 21-2021: диапазон значений номинальной избыточной СПМШ радиоизлучения в диапазоне частот 0,002–178,3 ГГц, в котором воспроизводится единица, составляет $1,07 \cdot 10^{-21}$ – $2,12 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц, что соответствует воспроизведению единицы ЭШТ в диапазоне значений 77,4–153,5 К. Диапазон значений ЭШТ в диапазоне частот 0,002–178,3 ГГц, в котором воспроизводится шкала единицы, составляет 77,4–20000 К.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерений при пяти независимых наблюдениях и НСП воспроизведения единицы СПМШ (ЭШТ) ГЭТ 21-2021 приведены в табл. 6.

Неопределённость измерений при воспроизведении единицы СПМШ: стандартная неопределённость, оцененная по типу А, составила 0,04–0,7 К; стандартная неопределённость, оцененная по типу В 0,1–1,3 К; расширенная неопределённость 0,2–3,1 К при коэффициенте охвата $k=2$.

В рамках проведения работ по внедрению ГЭТ 21-2021 разработана Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот 0,002–178,3 ГГц. При разработке поверочной схемы учтена возможность передачи единицы СПМШ генераторам шума с повышенной точностью.

Заключение. Разработанный комплекс аппаратуры ГЭТ 21-2021 позволяет воспроизводить единицу СПМШ и проводить калибровку, поверку рабочих эталонов единицы СПМШ и рабочих средств измерений высокой точности для нужд информационно-телекоммуникационных систем, систем вооружения, глобального мониторинга, при разработке и применении чувствительных приёмно-усилительных устройств.

Дальнейшие перспективы в части обеспечения единства измерений СПМШ связаны с созданием эталонных НГШ и компараторов в диапазоне миллиметровых длин волн.

Список источников

1. Адерихин В. И., Буренков Ю. А., Саргсян М. В., Уздин Р. И. Усовершенствование государственного первичного эталона единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения // Измерительная техника. 2012. № 12. С. 3–8.
2. Stelzried C. T., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, September 1968, vol. 16, no. 9, pp. 646–655. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1968.1126767>
3. Емельянова Л. П. Низкотемпературный СВЧ-генератор шума // Измерительная техника. 1985. № 9. С. 54–55.
4. Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б. Справочник по физико-техническим основам криогеники / Под ред. М. П. Малкова. М.: Энергия, 1973. 392 с.
5. Аверин В. Г., Аронзон Б. А., Бабаев Н. С. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
6. Петросян О. Г., Абрамова О. С., Гольба В. А., Жданова Т. Я., Юрчук Э. Ф. Низкотемпературный генератор шума

миллиметрового диапазона // Измерительная техника. 1984. № 11. С. 60–61.

7. Петросян О. Г., Саргсян М. В. Анализ погрешностей комплектного метода аттестации тепловых генераторов шума // Измерительная техника. 1993. № 3. С. 55–57.

8. Daywitt W., (1984), A Coaxial Noise Standard for the 1 GHz to 12.4 GHz Frequency Range, *Technical Note (NIST TN)*, 1074, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (accessed November 11, 2022).

9. Grosvenor C., Randa J., Billinger R., (2000), Design and Testing of NFRad – A New Noise Measurement System, *Technical Note (NIST TN)*, 1518, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, [online], available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=6264 (accessed: 11.11.2022).

10. Слаев В. А. Руководство по выражению неопределенности измерения / Пер. с англ., под ред. В. А. Слаева. СПб: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999. 134 с.

11. Randa J., Gerecht E., Gu D., Billinger R. L., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, March 2006, vol. 54, no. 3, pp. 1180–1189. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.864107>

12. Randa J., Walker D. K., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, April 2007, vol. 56, no. 2, pp. 551–554. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.891145>

13. Randa J., *84th ARFTG Microwave Measurement Conference*, 2014, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ARFTG.2014.7013402>

14. Rahmati M. M., Banai A., *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, 2021, vol. 31, no. 5, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1002/mmce.22599>

References

1. Aderikhin V. I., Burenkov Y. A., Sargsyan M. V., Uzdin R. I., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 55, pp. 1335–1343. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0131-3>

2. Stelzried C. T., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, September 1968, vol. 16, no. 9, pp. 646–655. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1968.1126767>

3. Emel'yanova L. P., *Measurement Techniques*, 1985, vol. 28, pp. 788–789. <https://doi.org/10.1007/BF00862752>

4. Malkov M. P. (ed.), *Handbook of physical and technical fundamentals of cryogenics*, Energoatomizdat Publ., Moscow, 1963, p. 90, 123, 176. (In Russ.)

5. Averin V. G., Aronzon B. A., Babaev N. S., *Tablicy fizicheskikh velichin. Spravochnik [Tables of physical quantities. Directory]*, Ed. by I. K. Kikoina, Moscow, Atomizdat Publ., 1976, 1008 p. (In Russ.)

6. Petrosyan O. G., Abramova O. S., Gol'ba V. A., Zhdanova T. Ya., Yurchuk E. F., *Measurement Techniques*, 1984, vol. 27, pp. 1053–1055. <https://doi.org/10.1007/BF00861834>

7. Petrosyan O. G., Sargsyan M. V., *Measurement Techniques*, 1993, vol. 36, pp. 335–337. <https://doi.org/10.1007/BF01003672>

8. Daywitt W., (1984), A Coaxial Noise Standard for the 1 GHz to 12.4 GHz Frequency Range, *Technical Note (NIST TN)*, 1074, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (accessed November 11, 2022).

9. Grosvenor C., Randa J., Billinger R., (2000), Design and Testing of NFRad – A New Noise Measurement System, *Technical Note (NIST TN)*, 1518, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, [online], available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=6264 (accessed: 11.11.2022).

10. Slaev V. A., *Guidance on the expression of measurement uncertainty*, Translated from English V. A. Slaev (ed.), St. Petersburg, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology Publ., 1999, 134 p. (In Russ.)

11. Randa J., Gerecht E., Gu D., Billinger R. L., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, March 2006, vol. 54, no. 3, pp. 1180–1189. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.864107>

12. Randa J., Walker D. K., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, April 2007, vol. 56, no. 2, pp. 551–554. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.891145>

13. Randa J., *84th ARFTG Microwave Measurement Conference*, 2014, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ARFTG.2014.7013402>

14. Rahmati M. M., Banai A., *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, 2021, vol. 31, no. 5, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1002/mmce.22599>

Статья поступила в редакцию 20.05.2022; одобрена после рецензирования 08.07.2022; принята к публикации 11.07.2022.
The article was submitted 20.05.2022; approved after reviewing 08.07.2022; accepted for publication 11.07.2022.

Национальная система измерений и национальная метрологическая инфраструктура: анализ документов D1 Международной организации законодательной метрологии

Алексей Павлович Чирков

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия, chirkovap@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы, возникающие в результате неоднозначной трактовки понятий, введённых в документах D1 Международной организации законодательной метрологии. Исследованы и проанализированы следующие документы D1: «Закон о метрологии» (1975), «Элементы закона по метрологии» (2004), «Основные положения для закона по метрологии» (2012) и «Национальные системы метрологии – развитие институциональных и законодательных основ» (2020). Рассмотрены законы Российской Федерации, разработанные на основе документов D1, а также отечественные и зарубежные публикации по данному вопросу. В результате проведённого анализа показаны проблемы, связанные с актуальными в современном мире и экономике метрологическими понятиями, такими как «национальная система измерений» и «национальная метрологическая инфраструктура». Показано различное видение специалистами в области метрологии содержания этих важных и повсеместно применяемых понятий. Сформулирован перечень основных элементов, входящих в состав понятий «национальная система измерений» и «национальная метрологическая инфраструктура». Результаты исследования можно использовать для актуализации нормативных и законодательных документов в области метрологии.

Ключевые слова: метрология, система измерений, инфраструктура, элементы метрологической инфраструктуры

Для цитирования: Чирков А. П. Национальная система измерений и национальная метрологическая инфраструктура: анализ документов D1 Международной организации законодательной метрологии // Измерительная техника. 2022. № 12. С. 10–14. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-10-14>

National measurement system and national metrological infrastructure: analysis of documents D1 of the International Organization of Legal Metrology

Alexey P. Chirkov

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia, chirkovap@yandex.ru

Abstract. The purpose of the research is to solve the problems associated with the lack of an unambiguous interpretation of the basic concepts introduced in International Documents D1. The main objectives of the study were aimed at analyzing documents D1 “Law on Metrology” (1975), “Elements of the Law on Metrology” (2004), “Basic provisions for the Law on Metrology” (2012) and “National Systems of Metrology – development of institutional and legislative foundations” (2020), laws of the Russian Federation, when the development of which they are used, as well as domestic and foreign publications on this issue. Based on the results of the analysis, the problems associated with the concepts of “national measurement system” and “national metrological infrastructure” used in metrology, which have become relevant in the modern world and economy, as well as the different views of specialists in the field of metrology on the content of these important and universally used concepts, are shown. As a result of the conducted research, a list of the main elements that make up the “national measurement system” and the “national metrological infrastructure” was formulated. The results of the study are intended for use in updating regulatory and legislative documents in the field of metrology and by specialists working in this field.

Keywords: metrology, measurement system, infrastructure, elements of metrological infrastructure

Введение. С середины прошлого века произошёл бурный рост экономики и смены технологий. Возникли новые требования к инфраструктурным видам деятельности, в том числе к метрологии. И это касается не только технологических аспектов, связанных с переходом на определение основных единиц величин на основе фундаментальных

физических констант, но и нормативной базы, т. е. законодательной метрологии.

Проблемы основных понятий в документах D1. В 1975 г. Международный комитет законодательной метрологии (МКЗМ) предложил правительствам стран-участниц рекомендации по разработке национальных законов по метрологии – документ D1¹

¹ OIML D 1: 1975. Law on Metrology.

«Закон о метрологии». Этот документ был предназначен для гармонизации национального научно-технического регулирования вопросов метрологии и должен был способствовать развитию взаимной помощи между государствами в целях создания, организации или расширения услуг метрологии.

Одной из проблем, с которой столкнулись метрологи и другие специалисты, участвовавшие в разработке и реализации закона о метрологии, стала проблема появления новых не определённых однозначно понятий. В частности, в документе D1 (1975) было введено понятие *legal metrology system*, однако его определение и перечень входящих в его состав элементов отсутствовали.

Проблемы понятия «национальная метрологическая инфраструктура». В 2004 г. принят документ D1 «Элементы закона по метрологии» [1]. В нём впервые официально введено понятие *national metrology infrastructure* (национальная метрологическая инфраструктура). В соответствии с документом D1 (2004) национальная метрологическая инфраструктура должна включать в себя следующие элементы:

законодательную базу, в том числе законы и правила, которыми устанавливаются положения, связанные с метрологией;

орган власти, подведомственный Правительству страны и ответственный за национальную политику в области метрологии и координацию деятельности ведомств, связанных с реализацией метрологических задач;

один или несколько институтов, ответственных за реализацию задач, предписанных на уровне общенациональной политики в области метрологии;

систему по аккредитации калибровочных лабораторий и, если это необходимо, испытательных лабораторий, инспекционных органов и органов по сертификации;

структуры по распространению знаний и расширению компетентности в области метрологии (например, по обучению, образованию, консультациям и т. д.);

метрологию (например, калибровка, обслуживание, обучение, консультирование, испытание типа, поверка и т. д.).

Однако и этому понятию ни в документе D1, ни в международных словарях по метрологии до сих пор не дано однозначное определение.

В 2012 г. принят документ D1 «Основные положения для закона по метрологии» [2]. В этом документе в дополнение к элементам, которые отнесены к метрологической инфраструктуре в документе D1 (2004), приведены ещё два – система национальных эталонов и сотрудничество в метрологической инфраструктуре.

В 2020 г. Международной организацией законодательной метрологии (МОЗМ) введена очередная версия документа D1 «Национальные системы метрологии – развитие

институциональных и законодательных основ» [3]. В нём подчеркнуты место и роль метрологической инфраструктуры в национальной инфраструктуре качества, а к ранее изложенным элементам инфраструктуры добавлены метрологическая прослеживаемость и национальная политика в области метрологии.

Анализ всех четырёх редакций документа D1 подтвердил отмеченные проблемы. Неоднозначность приводит как к непониманию, так и недооценке этих важных понятий не только для метрологии, но и для экономики и других сфер жизни страны.

Взгляд зарубежных специалистов и организаций на метрологическую инфраструктуру. В 2003 г. в [4] отмечено, что в 1990-х гг. введено понятие *инфратехнологии* (разнообразные наборы технических инструментов, включающие методы измерения и испытаний, применяемые при этом стандартные образцовые вещества, используемые эффективно, научные и прикладные базы данных, модели процессов и техническую основу для физических и функциональных интерфейсов между компонентами технологических систем). Инфратехнологии стали надёжной



Рис. 1. Национальная метрологическая инфраструктура (ИЛАК – Международная организация по аккредитации лабораторий)

Fig. 1. National metrology infrastructure (ILAC – International Laboratory Accreditation Cooperation)

инфраструктурой, которая поддерживает согласованность измерений, используемых в качестве основы для принятия решения в промышленности, науке и технологии, рыночной экономике, государственном регулировании и обществе, т. е. инфраструктурой измерений [5, 6].

Эта инфраструктура измерений (т. е. метрологическая инфраструктура) включает в себя:

Международную систему единиц;

национальные метрологические институты, создающие и поддерживающие национальные эталоны для обеспечения прослеживаемости измерений;

поверочные и калибровочные лаборатории;

органы по аккредитации лабораторий;

систему одобрения испытательных лабораторий;

метрологическое законодательство и меры его исполнения;

научные и технические комитеты, которые разрабатывают рекомендации и международные стандарты измерения;

подготовку метрологов, инженеров и техников по измерению.

В качестве одной из последних публикаций по тематике метрологической инфраструктуры следует отметить Руководство по метрологии для Азиатско-Тихоокеанского экономического сотрудничества (АТЭС) [7], подготовленное Азиатско-Тихоокеанским форумом по законодательной метрологии (АТФЗМ) и Азиатско-Тихоокеанской метрологической программой (АТП) (аналог ЕВРАМЕТ) при участии Национального института метрологии Германии PTB. В Руководстве по метрологии дан обзор элементов национальной метрологической инфраструктуры и показана их взаимосвязь [7, р. 26, Fig. 6]. Национальная метрологическая инфраструктура согласно [7] показана на рис. 1. Также в [7] отмечено, что инфраструктура включает метрологические элементы контроля и элементы прослеживаемости, которые крайне важны для измерений, выполненных в экономике и обществе.

Взгляд в Российской Федерации на метрологическую инфраструктуру. Современный взгляд на содержание метрологической инфраструктуры в Российской Федерации приведён в [8]. Отмечено, что метрология является одним из инфраструктурных видов деятельности, от уровня которого во многом зависит внедрение наукоёмких технологий. Метрология участвует в обеспечении как функционирования материального производства, так и условий жизнедеятельности людей. Это не позволяет отнести метрологическую инфраструктуру однозначно к производственной или непроизводственной сфере. В этом проявляется её общесистемное значение.

В [8] отмечено, что метрологическую инфраструктуру образуют сложные организационные структуры на международном и национальном уровнях. Организационную структуру на международном уровне образуют международные и региональные метрологические организации по метрологии, стандартизации, оценке соответствия и аккредитации.

Современная организационная структура метрологической инфраструктуры в Российской Федерации включает в себя следующие элементы:

федеральные органы исполнительной власти, осуществляющие установленные Правительством Российской Федерации функции в области метрологии – Министерство промышленности и торговли (Минпромторг) и Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт);

территориальные органы Росстандарта, осуществляющие государственный метрологический надзор;

государственные научные метрологические центры – метрологические научно-исследовательские институты, выполняющие функции разработчиков и хранителей государственных первичных эталонов единиц величин и обеспечивающие научно-методическую поддержку единства измерений в стране;

Государственные службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли, стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов, стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов;

государственные региональные центры стандартизации, метрологии и испытаний в субъектах Российской Федерации, выполняющие поверку средств измерений в сферах государственного регулирования, осуществляющие полномочия Росстандарта в регионах;

метрологические службы юридических лиц, осуществляющие координацию и контроль обеспечения единства измерений на предприятиях, и более 6500 аккредитованных на компетентность в области метрологии организаций, выполняющих измерения, испытания, поверку, калибровку, экспертизу и аттестацию в целях обеспечения единства измерений в Российской Федерации.

Важными составляющими метрологической инфраструктуры являются технические элементы: государственные первичные эталоны единиц величин, государственные эталоны, рабочие эталоны всех разрядов, стандартные образцы и испытательное оборудование, необходимые для осуществления метрологического контроля и надзора, в совокупности с необходимыми зданиями и сооружениями. В настоящее время основу метрологической инфраструктуры Российской Федерации составляют 158 государственных первичных эталонов, а также более 115 000 эталонов единиц величин, которые обеспечивают передачу единиц величин от первичных эталонов рабочим средствам измерений.

Проблемы понятия «национальная система измерений». Ещё одной проблемой, с которой сталкиваются специалисты при использовании документов D1, является то, что в документах D1 кроме понятия *метрологическая инфраструктура* использовано понятие *национальная система измерений*.

Содержание понятия *национальная система измерений* ни в одном из официальных международных документов по метрологии не приведено. Это затрудняет понимание и использование положений документов D1.

Для устранения недостатка автором проведён анализ понятия *национальная система измерений*, использованного в версиях документа D1 и законах Российской

Федерации «Об обеспечении единства измерений» № 4871-1² от 27.04.1993 г. и № 102-ФЗ³ от 26.06.2008 г.

Впервые в документах D1 понятие *национальная система измерений* появилось в 2004 г. При этом не было дано определение этого понятия и его элементов. Не дан ответ на возникшие вопросы и в следующих редакциях. Всё, что можно понять из различных редакций документа D1, так это то, что национальная система измерений создаётся правительством, имеет сложную структуру, её части требуют координации, должна быть обеспечена прозрачность деятельности системы, а в результатах деятельности системы должна быть обеспечена уверенность.

Взгляд зарубежных специалистов и организаций на национальную систему измерений. В [4] отмечено, что одним из первых понятие *национальная система измерений* предложило Национальное бюро стандартов США [9–11]. В [9] отмечено, что национальная система измерений имеет пять уровней:

- концептуальную систему, определяющую количественную систему мер и единиц измерений;
- основную техническую инфраструктуру;
- реализацию возможностей измерений, которые позволяют выполнять измерения специальных величин с заданной точностью;
- сеть обучения и принуждения;
- конечное применение измерений.

Взгляд в Российской Федерации на национальную систему измерений. В Российской Федерации в различное время предприняты попытки, если не сформулировать понятие *национальная система измерений*, то, по крайней мере, показать её содержание. В 1993 г. в [12] сформулированы основные элементы российской системы измерений. Её центральным звеном в тот период в соответствии с утверждённой структурой управления экономикой страны являлся Госстандарт России.

Система включала три подсистемы:

- законодательную* (или правовую), основными исполнителями которой определены государственные научные метрологические центры;
- исполнительную*, основными исполнителями которой определены аккредитованные лаборатории (центры), которые выполняли поверку, калибровку средств измерений, непосредственно измерения и испытания;
- надзорную*, исполнителями которой определены государственные инспекторы по обеспечению единства измерений.

Государственная система измерений была призвана удовлетворить метрологические

потребности производства, образования, науки, энергетики, транспорта и связи, населения, экологии, безопасности, здравоохранения, торговли и учёта, международных отношений, обороны, экономики, законодательства и др.

Ещё в одной публикации отмечено, что в процессе осуществляемой в Российской Федерации административной реформы сформировалась структура государственной системы измерений, которая включает в себя следующие элементы [13]:

федеральные органы исполнительной власти, осуществляющие функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию и государственному метрологическому надзору;

государственные научные метрологические институты и государственные региональные центры метрологии, подведомственные федеральному органу исполнительной власти по оказанию государственных услуг в области обеспечения единства измерений;

систему государственных служб в области обеспечения единства измерений;

систему территориальных органов, осуществляющих государственный метрологический надзор;



Рис. 2. Содержание национальной системы измерений Российской Федерации

Fig. 2. The content of the National Measurement System of Russia

² Российская Федерация. Законы. Об обеспечении единства измерений: Закон Российской Федерации 4871-1: [Введен постановлением Верховного Совета Российской Федерации 27 апреля 1993 года]. Ведомости Съезда народных депутатов Российской Федерации и Верховного Совета Российской Федерации, 1993, № 23, ст. 811.

³ Российская Федерация. Законы. Об обеспечении единства измерений: Федеральный закон № 102-ФЗ: [Принят Государственной Думой 11 июня 2008 года: одобрен Советом Федерации 18 июня 2008 года]. Собрание законодательства Российской Федерации от 30 июня 2008 г. № 26, ст. 3021.

метрологические службы юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, в том числе аккредитованные в области обеспечения единства измерений;

эталонную базу государственной системы измерений;

комплекс нормативно-правовых и нормативно-технических документов в области обеспечения единства измерений;

средства измерений, которые применяются в Российской Федерации.

Критически оценивая состав национальной системы измерений, изложенный в [8, 13], следует обратить внимание на тот факт, что большинство элементов национальной системы измерений совпадает с элементами национальной метрологической инфраструктуры в документах D1. Однако в этих документах не нашли отражения элементы, связанные с аккредитацией юридических и физических лиц в области обеспечения единства измерений, а также конституционная норма в части отнесения метрологических служб к ведению Российской Федерации, которые являются важными составляющими национальной системы измерений.

С учётом возрастания значения метрологических служб можно представить содержание национальной системы измерений Российской Федерации в следующем виде (рис. 2), разбив её условно на четыре подсистемы: законодательную, исполнительную, организационную и техническую.

Согласно рис. 2 в состав законодательной подсистемы национальной системы измерений Российской Федерации входят Конституция Российской Федерации и закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений». Исполнительная подсистема включает в себя как органы исполнительной власти, национальные метрологические институты, национальный орган по аккредитации, так и юридические и физические лица, аккредитованные в области обеспечения единства измерений. Важное место в национальной системе измерений занимают сегодня государственная метрологическая служба, метрологические службы органов власти и хозяйствующих субъектов, в состав которых входят эталоны единиц величин, средства и методики измерений, инструкции. Также большую роль играют специалисты, осуществляющие внутренний метрологический надзор, поверку и калибровку средств измерений.

Техническая подсистема включает государственные первичные и рабочие эталоны единиц величин, а также непосредственно средства измерений, а организационная подсистема включает структуры, связанные с подготовкой и повышением квалификации кадров, а также средства массовой информации и федеральную государственную информационную систему в области метрологии.

Заключение. Сегодня, в период зарождения нового технологического уклада, или как говорят – новой промышленной революции Industry-4, экономика и общество нуждаются в метрологии, соответствующей требованиям нового времени во всех звеньях, элементах национальной системы измерений, являющейся основой глобальной системы измерений. Именно для этого необходимо как понимание структуры национальной системы измерений, её содержания, так и понятий, с ней связанных.

Выполненный анализ позволил сформировать перечень элементов национальной системы измерений и метрологической инфраструктуры. Специалисты в области метрологии смогут более чётко представить суть рассмотренных понятий в условиях отсутствия содержательной части терминов этих понятий в официальных документах.

Список источников / References

1. OIML D1: 2004 (E), *Elements for a Law on Metrology*, available at: www.oiml.org/en/files/pdf_d/d001-e04.pdf (accessed: 20.09.2022).
2. OIML D1: 2012 (E), *Considerations for a Law on Metrology*, available at: www.oiml.org/en/files/pdf_d/d001-e12.pdf (accessed: 15.11.2022).
3. OIML D1: 2020 (E), *National metrology systems – Developing the institutional and legislative framework*, available at: www.oiml.org/en/files/pdf_d/d001-e20.pdf (accessed: 15.11.2022).
4. Birch J. A., *REPORT. Benefit of Legal Metrology for the Economy and Society. A study for the International Committee of Legal Metrology*, 2003, available at: http://www.oiml.org/en/files/pdf_e/e002-e03.pdf (accessed: 15.11.2022).
5. Tasse G., *Technology Infrastructure and Competitive Position*, Springer, New York, Kluwer Academic Publishers 1992, 306 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3608-6>
6. Tasse G., *Research Policy*, August 1991, vol. 20(4), pp. 345–361. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(91\)90094-7](https://doi.org/10.1016/0048-7333(91)90094-7)
7. *National Metrological Infrastructure*, 2nd ed., November 2016 (Joint Guide 1), available at: <http://www.apmpweb.org/documents/file/jointguide.pdf> (accessed: 15.11.2022).
8. Экономика метрологии: монография / В. В. Окрепилов, Ю. А. Антохина, Л. К. Исаев, А. П. Чирков. СПб.: ГУАП, 2017. 175 с. [*Economics of metrology: monograph*, V. V. Okrepilov, Yu. A. Antokhina, L. K. Isaev, A. P. Chirkov, St. Petersburg, GUAP Publ., 2017, 175 p. (In Russ.)]
9. Huntoon R. D., Concept of a National Measurement System: The systems approach is being applied to improve understanding of the nation's measurement activities, *Science*, 1967 Oct 6, vol. 158(3797), pp. 67–71, available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6054821> (accessed: 15.11.2022).
10. Sangster R. C., *Final Summary Report Study of the National Measurement System 1972-75*, Gaithersburg, MD, U.S. Dept. of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 1976. <https://doi.org/10.6028/NBS.IR.75-925>
11. Paulson B. W., *Economic analysis of the National Measurement System*, September 1977, A report from the 1972-75 Study of the National Measurement System by the NBS Institute for Basic Standards, pp. 1–37, available at: <https://archive.org/details/economicanalysis7594poul> (accessed: 15.11.2022).
12. Исаев Л. К. Российская система измерений // Измерительная техника. 1993. № 11. С. 27–30. [Isaev L. K., *Measurement Techniques*, 1993, vol. 36, pp. 1239–1243. <https://doi.org/10.1007/BF00978173>]
13. Окрепилов В. В. Менеджмент качества. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. [Okrepilov V. V., *Quality management*, St. Petersburg, Publishing House of the Polytechnic University, 2013 (In Russ.)]

Статья поступила в редакцию 12.10.2022; одобрена после рецензирования 25.11.2022; принята к публикации 28.11.2022.
The article was submitted 12.10.2022; approved after reviewing 25.11.2022; accepted for publication 28.11.2022.

Научная статья

УДК 519.612

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-15-22>

Обобщение коэффициента Жаккара для анализа данных с интервальной неопределённостью

Александр Николаевич Баженов^{1✉}, Анна Юрьевна Тельнова²

^{1, 2} Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

¹ Институт прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

¹ bazhenov_an@spbstu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7798-6478>

² anna.telnova@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0003-0495-7881>

Аннотация. Проанализированы выборки данных с интервальной неопределённостью. Предложено в качестве меры (функционала) совместности интервальных величин и их выборок использовать меру (индекс) Жаккара, широко применяемую при сравнении множеств в различных проблемных областях. Представлены сведения об интервальном анализе, классической и полной (Каухера) интервальной арифметике. Для интервальных величин введены необходимые понятия и определения операций, в частности, обобщения понятий пересечения и объединения множеств. Мера Жаккара обобщена на случай данных с интервальной неопределённостью и выборки интервальных данных. Подробно описаны различные варианты отношений интервалов – от их совпадения до несовместных случаев. Даны различные определения меры Жаккара, как симметричные, так и несимметричные относительно операндов. Рассмотрены связи предложенной меры с интервальной модой и результатов вычислений с твинами. Приведён практический пример нахождения информационного множества интервальной задачи с использованием новой меры. Представлены два направления применения как симметричной, так и несимметричной меры – вычислительные процессы (для характеристики итерационных вычислительных процессов) и анализ данных (для характеристики рабочих областей измерений и классификации данных по набору признаков).

Ключевые слова: коэффициент Жаккара, t -норма, мера совместности, интервальный анализ, накрывающие и ненакрывающие измерения и выборки, информационное множество, интервальная мода, интервальные твины

Благодарности: Авторы признательны С. И. Жилину, С. И. Кумкову, А. В. Пролубникову, Е. В. Чаусовой, С. П. Шарому – участникам Всероссийского вебинара по интервальному анализу – за творческое и конструктивное сотрудничество в области анализа данных с интервальной неопределённостью, а также В. М. Нестерову – за обсуждение вопросов, связанных с твинной арифметикой.

Финансирование: работы, представленные в разделах «Мера Жаккара и интервальная мода», «Применение JK к твинной арифметике и представление данных измерений с погрешностями нескольких видов», «Анализ данных с интервальной неопределённостью», выполнены при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 21-72-20007. Работы, представленные в разделах «Интервальная арифметика», «Обобщение коэффициента Жаккара» и «Несимметричные варианты меры $JK(x, y)$ » выполнены при поддержке ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН (в рамках госзаданий 0034-2019-0001; 0040-2019-0023).

Для цитирования: Баженов А. Н., Тельнова А. Ю. Обобщение коэффициента Жаккара для анализа данных с интервальной неопределённостью // Измерительная техника. 2022. № 12. С. 15–22. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-15-22>

Generalization of Jaccard index for interval data analysis

Alexander N. Bazhenov^{1✉}, Anna Yu. Telnova²

^{1, 2} Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Applied Mathematics and Mechanics, St. Petersburg, Russia

¹ bazhenov_an@spbstu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7798-6478>

² anna.telnova@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0003-0495-7881>

Abstract. The article is devoted to the analysis of data samples with interval uncertainty. We propose to use the Jaccard measure (index), which is widely used when comparing sets in various problem areas, as a measure (functional) of the compatibility of interval values and their samples. Information about interval analysis, classical and complete (Kaucher) interval arithmetic is presented. For interval quantities, the necessary concepts and definitions of operations are introduced, in particular, generalizations of the concepts of intersection and union of sets. The Jaccard measure is generalized to the case of data with interval uncertainty and samples of interval data. Various variants of interval relations are described in detail – from their coincidence to incompatible cases. Various definitions of the Jaccard measure, both symmetric and non-symmetric with respect to operands, are considered. The question of the connection of the proposed measure with the interval mode and for estimating the results of calculations with twins is discussed. A practical example of finding the information set of an interval problem using a new measure is given.

Keywords: Jaccard index, t -norm, measure of compatibility, interval analysis, covering and non-covering measurements and samples, information set, interval mode, interval twins

Acknowledgments: The authors are grateful to the participants of the All-Russian webinar on interval analysis S. I. Zhilin, S. I. Kumkov, A. V. Prolubnikov, E. V. Chausova, and S. P. Shary for creative and constructive cooperation in the field of data analysis with interval uncertainty and also to V. M. Nesterov for discussion of issues related to twin arithmetic.

Financial Support: works presented in the sections "Jaccard measure and interval mode", "Application JK to twin arithmetic and presentation of measurement data with several types of error", "Data analysis with interval uncertainty", supported by the Russian Science Foundation, project no. 21-72-20007. The works presented in the sections "Interval arithmetic", "Generalization of the Jaccard coefficient" and "Asymmetric variants of the JK(x, y) measure" were supported by the Ioffe Institute RAS (within the framework of the RF state task 0034-2019-0001 and 0040-2019-0023).

Введение. Одной из задач анализа данных является выяснение степени сходства элементов выборки между собой или степень сходства различных выборок. Для характеристики степени сходства необходимо ввести количественную меру (коэффициент сходства). Определим меру сходства формально. Мера сходства двуместная $S(A, B) \rightarrow [0, 1]$ – вещественная функция на множестве пар объектов (A, B) , где A, B – произвольные конечные множества. Формально принадлежность операции к мерам сходства определяется системой следующих свойств:

- ограниченности $0 \leq S(A, B) \leq 1$;
- симметрии $S(A, B) = S(B, A) \geq 0$;
- рефлексивности $S(A, B) = 1 \Leftrightarrow A = B$;
- транзитивности $A \subseteq B \subseteq C \Rightarrow S(A, B) \geq S(A, C)$.

Существуют и иные системы аксиом сходства. Перечисленные свойства, также называемые t -нормой, можно реализовать разными способами. Меры включения и сходства широко применяются в практике, начиная со второй половины прошлого века. В публикации [1] подробно рассмотрены различные меры сходства и их взаимные связи. Первая подобная мера была предложена Жаккардом в 1901 г. применительно к биологии. Коэффициент J (индекс) Жаккара для множеств A, B имеет вид

$$J(A, B) = \frac{n(A \cap B)}{n(A \cup B)}, \quad (1)$$

где n – мощность (число представителей) множеств.

В компьютерных приложениях (обработка изображений, машинное обучение) меру сходства множеств часто обозначают IoU (intersection over union).

Цель настоящей работы – дать математическое определение предложенного варианта вычисления бинарной меры сходства множеств, рассмотреть различные варианты её вычисления и изучить её свойства. Мера обобщена для работы с выборками данных с интервальной неопределённостью. В статье приведён ряд примеров и представлены различные направления дальнейших исследований.

Интервальная арифметика. В настоящей публикации меры сходства применим к математическим объектам с интервальной неопределённостью. Современная система обозначений интервальных объектов, использованная в настоящей статье, приведена в [2]. Здесь и далее по статье интервальные объекты обозначены курсивным полужирным шрифтом, как это принято в интервальной арифметике.

Классическая интервальная арифметика $\mathbb{IR}$ – алгебраическая система, образованная интервалами $\mathbf{x} = [\underline{x}, \bar{x}] \subset \mathbb{R}$ так, что для любой арифметической операции «*» из множества $\{+, -, \cdot, /$ результат операции между интервалами определяется как $\mathbf{x} * \mathbf{y} = \{x * y | x \in \mathbf{x}, y \in \mathbf{y}\}$, где x, y – вещественные

числа; $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ – интервалы. Символ $\mathbb{I}$ в обозначении $\mathbb{IR}$ используется для отличия интервальной и вещественной арифметик, при этом $\mathbb{IR} \supseteq \mathbb{R}$.

Введём характеристики интервала $\mathbf{a}$:

середина $\text{mid} \mathbf{a} = (\bar{a} + \underline{a})/2$;

радиус $\text{rad} \mathbf{a} = (\bar{a} - \underline{a})/2$;

ширина $\text{wid} \mathbf{a} = \bar{a} - \underline{a}$,

где $\bar{a}, \underline{a}$ – правая и левая (или верхняя и нижняя) границы интервала $\mathbf{a}$.

В более общей постановке задачи интервального анализа можно решать в так называемой полной интервальной арифметике или арифметике Каухера $\mathbb{KR}$ [3]. Эта арифметика получается присоединением неправильных интервалов $[\underline{x}, \bar{x}]$, $\underline{x} > \bar{x}$ к множеству $\mathbb{IR}$. Введение интервальной арифметики Каухера мотивировано рядом ограничений классической интервальной арифметики: отсутствием обратных элементов относительно операций сложения и умножения; невозможностью в общем случае взятия минимума по включению; сложностью с постановкой минимаксных задач. Применение неправильных интервалов позволяет строить оригинальные методы решения задач с интервальными объектами.

Обобщение коэффициента Жаккара. Для анализа данных необходимо сравнивать интервальные объекты универсальным образом, независимо от свойства накрытия. Введём числовую характеристику степени совместности двух интервалов $\mathbf{x}, \mathbf{y} \subset \mathbb{IR}$ в виде $JK(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ (K указывает на отношение к интервальной арифметике Каухера):

$$JK(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\text{wid}(\mathbf{x} \wedge \mathbf{y})}{\text{wid}(\mathbf{x} \vee \mathbf{y})}, \quad (3)$$

где в качестве меры для коэффициента Жаккара, в отличие от (1), служит ширина интервала (2), а вместо операций пересечения и объединения множеств – операции взятия соответственно минимума $\wedge$ и максимума $\vee$ по включению двух величин в полной интервальной арифметике (Каухера), описываемые как

$$\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} = [\max\{\underline{a}, \underline{b}\}, \min\{\bar{a}, \bar{b}\}];$$

$$\mathbf{a} \vee \mathbf{b} = [\min\{\underline{a}, \underline{b}\}, \max\{\bar{a}, \bar{b}\}].$$

В общем случае минимум по включению в выражении (3) может быть неправильным интервалом отрицательной ширины. Для дальнейшего обобщения меры (3) на множества интервалов запишем её численное выражение

$$JK(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\min\{\bar{x}, \bar{y}\} - \max\{\underline{x}, \underline{y}\}}{\max\{\bar{x}, \bar{y}\} - \min\{\underline{x}, \underline{y}\}}. \quad (4)$$

В записи формулы (4) вместо ширин интервалов используем явные выражения взятия минимума и максимума по включению, обеспечивающие универсальный характер (4), независимо от того, является ли результат операции взятия минимума по включению $\wedge$ правильным или неправильным интервалом.

Проиллюстрируем различные меры бинарной совместности. Рассмотрим разные случаи относительного положения интервалов x, y и различные меры совместности. Пусть

$$\min\{\underline{x}, \underline{y}\} = 1; \max\{\bar{x}, \bar{y}\} = 6.$$

На рис. 1 представлены возможные варианты относительного положения интервалов x, y и соответствующие им значения меры JK (см. формулу (4)). Просуммировав указанные варианты, получим неравенство

$$-1 \leq JK(x, y) \leq 1.$$

Для непустых пересечений интервалов классическая мера Жаккара (1) (на рис. 1 не приведена) и новая мера $JK(x, y)$ (3), (4) дают одинаковые результаты. Для пустых пересечений интервалов классическая мера Жаккара равна нулю, а $JK(x, y)$ численно описывает меру несовместности от 0 до -1 .

Несимметричные варианты меры $JK(x, y)$. Мера (3) симметрична относительно своих аргументов, что может оказаться неудобным в случае большой разницы ширин аргументов. Желательно, чтобы при этом и чувствительность меры существенно различалась при её взятии по разным аргументам. В таком случае полезны несимметричные варианты:

$$JK_x(x, y) = \frac{\text{wid}(x \wedge y)}{\text{wid } x}; \quad (5)$$

$$JK_y(x, y) = \frac{\text{wid}(x \wedge y)}{\text{wid } y}. \quad (6)$$

Подобные выражения в литературе называют мерами сходства (similarity, overlapping ratio [4, 5]). Выражения (5), (6) отличаются от аналогичных из [4, 5] тем, что допускают неправильность интервала при взятии минимума по включению.

Пример. Пусть $x = [1; 2]$, $y = [3; 7]$. Вычислим меры (5), (6):

$$JK_x(x, y) = \frac{2-3}{1} = -1; \quad (7)$$

$$JK_y(x, y) = \frac{2-3}{4} = -\frac{1}{4}. \quad (8)$$

Абсолютные значения выражений (7), (8) отражают меру «несходства» интервалов x, y относительно их ширин. При этом значение выражения (8) существенно меньше. Этот факт соответствует разнице ширин интервалов x, y и позволяет строить на этой основе содержательные конструкции, например при процедурах регуляризации.

Мера Жаккара для выборки интервальных данных.

Мера совместности, введённая для двух интервалов в форме (3), допускает естественное обобщение на случай

интервальной выборки. Пусть имеется интервальная выборка $X = \{x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$. Определим меру $JK(X)$ как

$$JK(X) = \frac{\text{wid}(\bigwedge_i x_i)}{\text{wid}(\bigvee_i x_i)}, \quad (9)$$

$$\text{где } \bigvee_{1 \leq i \leq n} x_i = [\min_{1 \leq i \leq n} \underline{x}_i, \max_{1 \leq i \leq n} \bar{x}_i]; \quad \bigwedge_{1 \leq i \leq n} x_i = [\max_{1 \leq i \leq n} \underline{x}_i, \min_{1 \leq i \leq n} \bar{x}_i].$$

Важно, что в случае интервальной выборки из двух элементов выражение (9) переходит в выражение (3).

Меры совместности для интервальных величин рассмотрены в публикациях [4–6], но только для совместных выборок.

Пример. Вычислим коэффициент Жаккара (9) для совместной $X_1 = \{[0; 8], [2; 9], [3; 10]\}$ и несовместных $X_2 = \{[9; 10], [10; 11], [11; 12]\}$ выборок:

$$JK(X_1) = \frac{8-3}{10-0} = \frac{5}{10} = 0,5;$$

$$JK(X_2) = \frac{10-11}{12-9} = -\frac{1}{3} = -0,33(3).$$

Мера Жаккара и интервальная мода. Рассмотрим связь меры JK с другими характеристиками интервальных выборок, например с интервальной модой выборки. В книге [7], следуя идеям публикации [8], этот объект (интервал) введён следующим образом: «Модой интервальной выборки $\text{mode } X$ назовём совокупность интервалов пересечения наибольших совместных подвыборок рассматриваемой

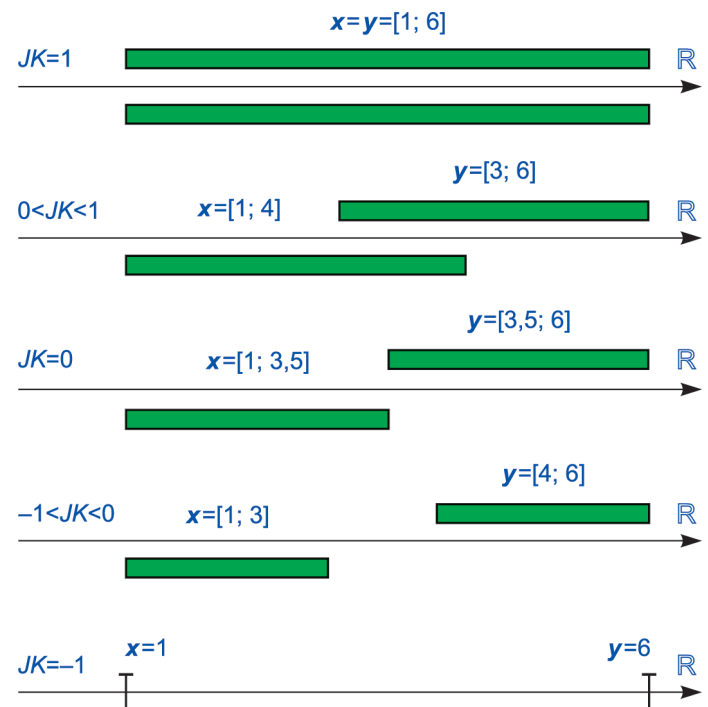


Рис. 1. Варианты отношений положения двух интервалов и значения меры Жаккара JK

Fig. 1. Relations variants between the position of two intervals and JK value

выборки». Наибольшая длина совместных подвыборок данной выборки называется частотой моды.

Рассмотрим простейший пример, иллюстрирующий связь меры Жаккара и интервальной моды. На рис. 2 представлены варианты вычисления интервальной моды и меры совместности моды для выборки из двух интервалов $X = \{x, y\}$, откуда следует связь между интервальной модой и значением меры Жаккара. При этом интервальная мода является сложным объектом, дающим дополнительную информацию о выборке. Интервальная мода в общем случае является мультиинтервалом [7]. Природа меры Жаккара JK иная и носит численный характер. В числителе выражения (5) находится минимум по включению, и его положение при мультимодовых распределениях может не принадлежать ни одному интервалу выборки. В этом случае требуются дополнительные выражения для численного описания интервальной моды.

Предварительно можно заметить, что значение $JK(\text{mode}X)$ в случае мультиинтервальности моды неположительно. При этом абсолютное значение $JK(\text{mode}X)$ зависит как от расстояния между интервалами мультивыборки, так и от ширины их максимума по включению.

Пример. Для ненакрывающей выборки $X = \{[1; 4], [5; 9] \mid [1,5; 4,5], [6; 9]\}$ интервальная мода есть объединение двух интервалов (мультиинтервал) $\text{mode}X = [1,5; 4] \cup [6; 9]$, и мера совместности определяется как

$$JK(\text{mode}X) = \frac{4-6}{9-1} = -0,25.$$

При этом находящийся в числителе выражения (4) минимум по включению $\bigwedge_{1 \leq i \leq n} x_i = [6; 4]$ для элементов выборки X является неправильным интервалом, который в данном случае одновременно является и минимумом по включению для элементов мультиинтервала интервальной моды.

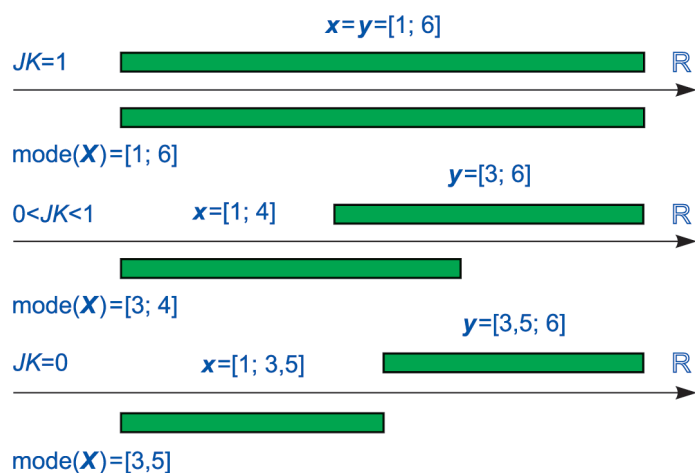


Рис. 2. Варианты отношений положения интервалов для накрывающей выборки, интервальная мода и значения меры Жаккара JK

Fig. 2. Variants of relations between the position of intervals for the covering sample, interval mode and JK values

Применение JK к твинной арифметике и представление данных измерений с погрешностями нескольких видов. На практике концы интервалов, представляющие результаты измерений, могут быть известны неточно, так что возникает необходимость работы с интервалами, имеющими интервальные концы. Такие объекты известны в интервальном анализе и называются твинами (англ. twin – сокращение от twice interval, двойной интервал).

Твин, как «интервал интервалов» или интервал с интервальными концами, представим как

$$X = [a, b] = [\underline{a}, \bar{a}], [\underline{b}, \bar{b}]. \quad (10)$$

Альтернативное рассмотрение твинов как объектов, дающих внутреннюю и внешнюю оценку интервальных вычислений, предложено в [9]:

$$X = [X^{\text{in}}, X^{\text{out}}] = [\underline{X}^{\text{in}}, \bar{X}^{\text{in}}], [\underline{X}^{\text{out}}, \bar{X}^{\text{out}}], \quad (11)$$

где $X^{\text{in}}, X^{\text{out}}$ – интервалы внутренней и внешней оценок интервальных вычислений.

В определениях (10), (11) твин определяется четырьмя значениями. Функционал JK также зависит от четырёх значений – концов двух интервалов x, y . Если взять в качестве аргументов JK внутреннюю и внешнюю компоненты твина, получим относительную величину, характеризующую соотношение внутренней и внешней оценки твина X в форме (11):

$$\delta X = JK(X^{\text{in}}, X^{\text{out}}). \quad (12)$$

Пример. Дан твин температуры в форме (10):

$$T = [[19,15; 19,85], [20,15; 20,85]] \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Запишем его в форме Нестерова:

$$T = [[19,85; 20,15], [19,15; 20,85]] \text{ } ^\circ\text{C}.$$

В соответствии с конструкцией (12) имеем «относительную ширину твина»

$$\delta T = JK(T^{\text{in}}, T^{\text{out}}) = 0,18.$$

Положительность величины δT отражает факт согласованности внутренней и внешней оценок интервального объекта, а абсолютное значение – «запас надёжности» оценки. Отрицательность величины δT соответствует непустому пересечению интервалов нижних и верхних оценок интервала T .

Анализ данных с интервальной неопределённостью.

Анализ интервальных данных возник в последние десятилетия XX в. как альтернатива традиционной «вероятностной статистике», основанной на методах теории вероятностей. Различным аспектам анализа интервальных данных посвящено много работ, в частности [10–19]. Анализ данных с интервальной неопределённостью (статистика интервальных данных, анализ интервальных данных) рассмотрен в книге [8],

где представлена система понятий и терминов, относящихся к обработке указанных данных. Одно из важнейших понятий интервальной статистики – накрывающее измерение (замер) – интервальный результат измерения, который гарантированно содержит истинное значение измеряемой величины [7]. Измерение, для которого нельзя утверждать, что оно содержит истинное значение измеряемой величины, будем называть ненакрывающим. Накрывающее измерение является гарантированной двусторонней «вилкой» значений измеряемой величины, тогда как для ненакрывающего измерения ничего подобного утверждать нельзя. Это придаёт накрывающим измерениям принципиально более высокий статус и позволяет строить на их основе более содержательные конструкции.

Далее назовём накрывающей выборкой совокупность измерений, доминирующая часть (большинство и т. п.) измерений (наблюдений) которой являются накрывающими. Напротив, выборку назовём ненакрывающей, если преобладающая часть входящих в неё измерений – ненакрывающие. Возможные альтернативные термины – «включающее измерение», «охватывающее измерение» (их отрицание – «невключающее», «неохватывающее»). Предлагаемые английские эквиваленты – enclosing measurement, covering measurement. Такое определение носит нестрогий характер, что позволит избежать слишком строгих и редко выполнимых требований к выборкам.

При формулировании новых определений следуем принципу соответствия в методологии науки – любая новая научная теория должна включать старую теорию и её результаты как частный предельный случай. Применительно к мере совместности далее более общие конструкции содержат (как частные случаи) ранее определённые конструкции. Символически это можно выразить как

$$\mathbb{K}\mathbb{R} \supseteq \mathbb{I}\mathbb{R} \supseteq \mathbb{R}.$$

Также важно, чтобы меры, введённые на более общих объектах, а именно на выборках интервальных величин и многомерных интервальных объектах, естественным образом переходили на конструкции для более простых объектов.

Таким образом, меру $JK(\mathbf{X})$ в форме (3) можно определить как для ненакрывающих выборок в арифметике Каухера, так и накрывающих выборок в классической интервальной арифметике, а также для вещественных «точечных» выборок.

Пример. Продемонстрируем применение индекса Жаккара для обработки данных. Предметная область относится к физике полупроводников – исследованиям фотоэлектрических характеристик испытываемого датчика, проводимым специалистами лаборатории фотоэлектрических преобразователей Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе. Имеются две выборки данных с интервальной неопределённостью¹. Выборки $\mathbf{X}_1$, $\mathbf{X}_2$ соответственно относятся к датчикам (photodetector, PD) PD1, PD2 (эталон). Число отсчётов в выборках равно 200. Датчик PD1 калибруется по эталону PD2. Зависимость между квантовыми эффективностями

датчиков QE_{PD1} , QE_{PD2} предположим постоянной для каждой пары наборов измерений:

$$QE_{PD2} = \frac{I_{PD2}}{I_{PD1}} QE_{PD1}, \quad (13)$$

где I_{PD1} , I_{PD2} – измеренные силы тока детекторов.

Представим данные так, чтобы применить понятия статистики данных с интервальной неопределённостью. Один из распространённых способов получения интервальных результатов при первичных измерениях – это «обинтерваливание» точечных значений, когда к точечному (базовому) значению $\dot{x}$, которое считывается по показаниям измерительного прибора, прибавляется интервал погрешности ε :

$$\mathbf{x} = \dot{\mathbf{x}} + \varepsilon.$$

Интервал погрешности зададим как уравновешенный интервал

$$\varepsilon = [-\varepsilon, \varepsilon],$$

для конкретной процедуры измерений $\varepsilon = 10^{-4}$ мВ.

Из-за существенного дрейфа измерительной аппаратуры данные предварительно обработаны, и дрейф вычтен. После вычислений данные имеют неравноширинный вид, представленный на рис. 3.

Согласно терминологии интервального анализа рассматриваемая выборка – это вектор интервалов, или интервальный вектор $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n)$. Информационным множеством в случае оценивания единичной физической величины по выборке интервальных данных будет также информационный интервал – интервал, содержащий значения оцениваемой величины, которые совместны с измерениями выборки (согласуются с данными этих измерений).

Вычислим $JK(\mathbf{X})$ для набора, составленного из объединения значений исходных выборок $\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2\}$. Применив программы для вычислений в интервальных арифметиках (см <https://github.com/szhilin/octave-interval-examples>), получим $JK(\mathbf{X}) = -0.65$. Отрицательное значение $JK(\mathbf{X})$ характеризует несовместность выборки $\mathbf{X}$.

Используем модель (13) связи выборок для разных измерений ($\mathbf{R}$ – неизвестный множитель):

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{R}\mathbf{X}_2.$$

В соответствии с задачами исследований датчиков необходимо дать точечную и интервальные оценки $\mathbf{R}$. Оптимизируем параметр $\mathbf{R}$ следующим образом. Точечная оценка отношения квантовых эффективностей равна

$$\mathbf{R}_{\text{opt}} = \underset{\mathbf{R}}{\operatorname{argmax}} JK(\mathbf{X}'), \quad (14)$$

где

$$\mathbf{X}' = \{\mathbf{R}\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2\}.$$

¹ Шварц М. З., рабочие материалы. URL: <https://github.com/AlexanderBazhenov/Solar-Data> (дата обращения: 18.11.2022).

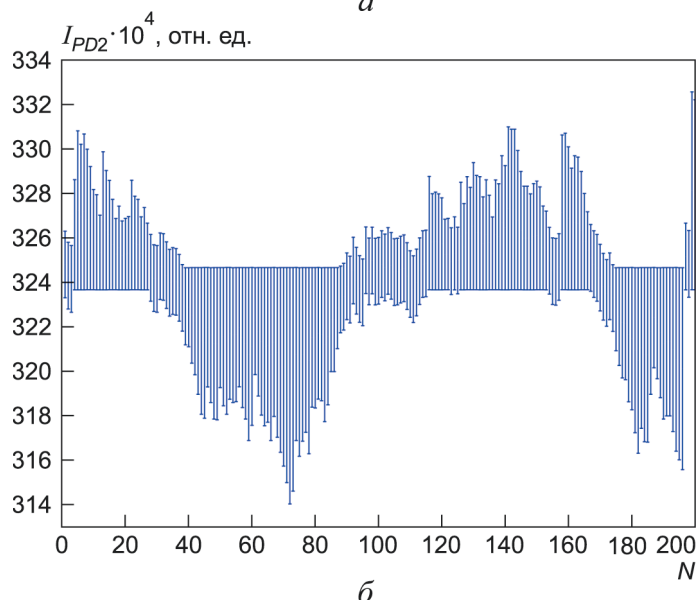
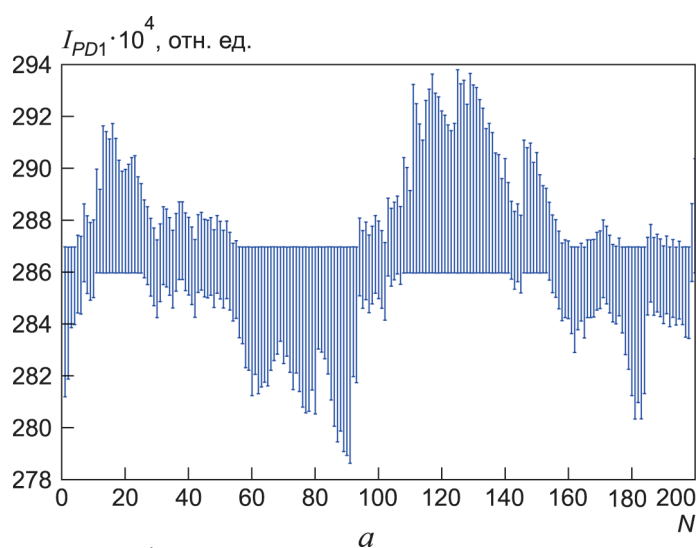


Рис. 3. Выборки данных измерений квантовой эффективности для исследуемого (а) и эталонного (б) датчиков

Fig. 3. Quantum efficiency measurement data samples for the studied (a) and reference (b) sensors

Интервальная оценка R соответствует информационному множеству задачи

$$R: JK(X') \geq 0. \quad (15)$$

Проведем вычисления по формуле (14) и построим график $JK(R)$ (рис. 4), где выделена область, соответствующая условию (15). Оптимальное значение в постановке (14) $R_{\text{опт}} = 1,132$, информационное множество значений (15) $R = [1,12; 1,14]$.

Гистограмма значений объединённой выборки X' при $R_{\text{опт}}$ показана на рис. 5. Распределение частот гистограмм близко к симметричному и унимодальному, что положительно свидетельствует о корректности процедуры оптимизации.

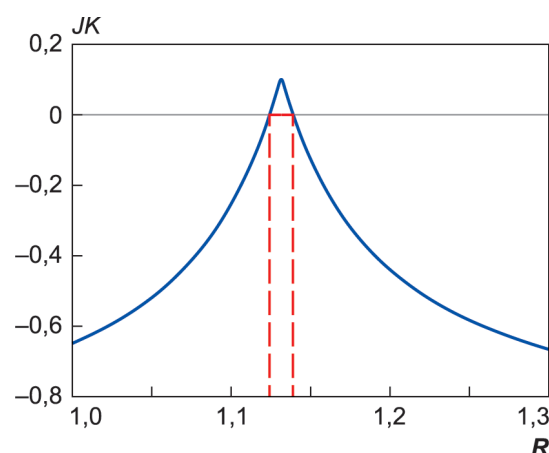


Рис. 4. Зависимость коэффициента Жаккара JK от параметра R

Fig. 4. Jaccard coefficient dependence on R

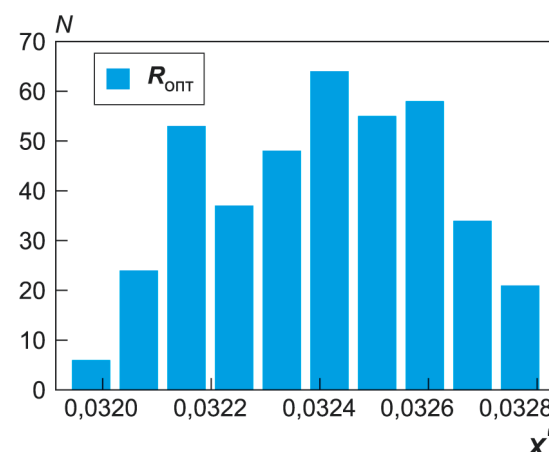


Рис. 5. Гистограмма значений объединённой выборки X' при оптимальном значении $R_{\text{опт}}$

Fig. 5. Histogram of values of the X' combined sample at $R_{\text{опт}}$

Применения меры совместности. Для вычислительных процессов можно предложить два направления применения предложенной меры.

Первое направление – характеристика вычислительных процессов. При итерационном решении интервальных систем уравнений необходимо следить за пересечением множеств последовательных операций. Для этого удобным средством является несимметричная мера, равная отношению пересечений множеств последовательных операций к ширине итерационного оператора (Ньютона, Кравчика и т. п.). Второе направление – решение интервальных систем линейных алгебраических уравнений (ИСЛАУ). Традиционно разрешимость ИСЛАУ (иначе – непустоту множеств решений) исследуют с помощью техники распознающих функционалов. Распознающие функционалы строят таким образом, что их знак указывает на непустоту множеств решений. Для основных типов постановки задач решения ИСЛАУ – нахождения объединённого, допускового

и управляемого множеств решений – можно построить распознающие функционалы на основе симметричных и несимметричных мер совместности.

Для анализа данных предложенную меру можно использовать для характеристики области значения переменной. При измерении какой-либо величины набором датчиков необходимо выделять рабочие области параметров или диапазоны времени измерений. Для этого естественным образом подходит мера совместности. Для выделения надёжного диапазона измерения следует задать её практически разумный порог. Сходная ситуация возникает при многократных измерениях какой-либо величины. Например, в случае прямого и обратного хода в исследуемой системе может возникать гистерезисный тип данных, в том числе и несовместных. Для характеристики (выявления гистерезиса) можно использовать меру совместности.

В задачах кластеризации (факторизации) рабочим инструментом является классификация данных по набору признаков. Популярным примером является гистограммирование. Если данные существенно интервальные, одно измерение может попадать не в один интервал (бин) множества, по которому проводится классификация. В таком случае удачно подходит несимметричная мера совместности: выбор делается по её максимальному значению.

Заключение. Предложенная мера позволила обобщить понятие сходства множеств на интервальные объекты: пары интервалов и выборки данных с интервальной неопределённостью. Существенно, что мера даёт содержательную информацию и для несовместных выборок данных. Приведённый пример продемонстрировал возможность получения интервальной оценки неизвестного параметра модели в задаче восстановления зависимости. Намечены направления дальнейших исследований по применению предложенной меры для характеристики вычислительных процессов и анализа данных с интервальной неопределённостью.

Список источников

1. Сёмкин Б. И. О связи между средними значениями двух мер включения и мерами сходства // Бюллетень Ботанического сада-института ДВО РАН. 2009. Вып. 3. С. 91–101.
2. Курфорт Б., Накао М., Ноймайер А., Румп З., Шарый С. П., ван Хентенрик П. Стандартизация обозначений в интервальном анализе // Вычислительные технологии. 2010. Т. 15. № 1. С. 7–13. (In Eng.)
3. Shary S., Numerical computation of formal solutions to interval linear systems of equations, arXiv:1903.10272v1 [math.NA]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.10272>
4. Kabir S., Wagner C., Havens T. C., Anderson D. T., Aickelin U., *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2017)*, 2017. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2017.8015623>
5. Wilkin T., Beliakov G., *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2019)*, 2019, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2019.8858850>
6. Shaily Kabir, Christian Wagner, Zack Ellerby, Towards Handling Uncertainty-at-Source in AI – A Review and Next Steps for Interval Regression, arXiv:2104.07245 [cs.LG]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.07245>
7. Баженов А. Н., Жилин С. И., Кумков С. И., Шарый С. П. Обработка и анализ данных с интервальной неопределённостью, 2022. URL: <http://www.nsc.ru/interval/Library/AppBooks/InteDataProcessing.pdf> (дата обращения: 10.11.2022).
8. Hu C., Hu Z. H., On statistics, probability, and entropy of interval-valued datasets, *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. IPMU 2020. Communications in Computer and Information Science*, eds. Lesot M. J. et al., Cham, Springer, 2020, vol. 1239. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50153-2_31
9. Нестеров В. М. Твинные арифметики и их применение в методах и алгоритмах двустороннего интервального оценивания: дисс. докт. физ.-мат. наук, Санкт-Петербург (Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН), 1999.
10. Шарый С. П. Сильная согласованность в задаче восстановления зависимостей при интервальной неопределённости данных // Вычислительные технологии. 2017. Т. 2. № 2. С. 150–172. <http://dx.doi.org/10.14529/mmph170105>
11. Шарый С. П. Метод максимума согласования для восстановления зависимостей по данным с интервальной неопределённостью // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2017. № 6. С. 3–19. <https://doi.org/10.7868/S0002338817060014>
12. Шарый С. П. Выявление выбросов в методе максимума согласования при анализе интервальных данных / Сборник трудов Всероссийской конференции по математике с международным участием «МАК-2018». Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2018. С. 215–218.
13. Шарый С. П. О мере вариативности оценки параметров в статистике интервальных данных // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24. № 5. С. 90–108. <https://doi.org/10.25743/ICT.2019.24.5.008>
14. Шарый С. П. Задача восстановления зависимостей по данным с интервальной неопределённостью // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 1. С. 62–74. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-1-62-74>
15. Zhilin S. I., *Reliable Computing*, 2005, vol. 11, pp. 433–442. <https://doi.org/10.1007/s11155-005-0050-3>
16. Zhilin S. I., *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2007, vol. 88, no. 1, pp. 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2006.10.004>
17. Кумков С. И. Обработка экспериментальных данных ионной проводимости расплавленного электролита методами интервального анализа // Расплавы. 2010. № 3. С. 79–89.
18. Kumkov S. I., Mikushina Yu. V., *Reliable Computing*, 2013, vol. 19, pp. 197–214.
19. Nguyen H. T., Kreinovich V., Wu B., Xiang G., *Computing Statistics under Interval and Fuzzy Uncertainty. Applications to Computer Science and Engineering*, Springer, Berlin-Heidelberg, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-24905-1>

References

1. Semkin B. I., On the relation between mean values of two measures of inclusion and measures of similarity, *Byulleten' Botanicheskogo sada-instituta DVO RAS*, 2009, vol. 3, pp. 91–101. (In Russ.)
2. Kearfott R. B., Nakao M. T., Neumaier A., Rump S. M., Shary S. P., van Hentenryck P., Standardized notation in interval analysis, *Computational Technologies*, 2010, vol. 15, no. 1, pp. 7–13.
3. Shary S., Numerical computation of formal solutions to interval linear systems of equations, arXiv:1903.10272v1 [math.NA]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.10272>
4. Kabir S., Wagner C., Havens T. C., Anderson D. T., Aickelin U., *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2017)*, 2017. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2017.8015623>
5. Wilkin T., Beliakov G., *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2019)*, 2019, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2019.8858850>
6. Shaily Kabir, Christian Wagner, Zack Ellerby, Towards Handling Uncertainty-at-Source in AI – A Review and Next Steps for Interval Regression, arXiv:2104.07245 [cs.LG]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.07245>
7. Bazhenov A. N., Zhilin S. I., Kumkov S. I., Sharyj S. P., *Processing and analysis of data with interval uncertainty*, 2022, available at: <http://www.nsc.ru/interval/Library/ApplBooks/InteDataProcessing.pdf> (accessed: 10.11.2022).
8. Hu C., Hu Z. H., On statistics, probability, and entropy of interval-valued datasets, *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. IPMU 2020. Communications in Computer and Information Science*, eds. Lesot M. J. et al., Cham, Springer, 2020, vol 1239. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50153-2_31
9. Nesterov V. M., Twin arithmetics and their application in methods and algorithms of two-sided interval estimation: diss. doct. phis. math. sci. St. Petersburg (St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences), 1999. (In Russ.)
10. Shary S., *Computational technologies*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 150–172. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.14529/mmph170105>
11. Shary S., *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2017, vol. 56, no. 6, pp. 897–913. <https://doi.org/10.7868/S0002338817060014>
12. Shary S., Identification of outliers in the maximum matching method in the analysis of interval data, *Proceedings of the All-Russian Conference in Mathematics with International Participation "MAC-2018"*, Barnaul, AltGU Publishing House, 2018, pp. 215–218. (In Russ.)
13. Shary S., On a variability measure for estimates of parameters in the statistics of interval data, *Computational technologies*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 90–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.25743/ICT.2019.24.5.008>
14. Shary S. P., Data fitting problem under interval uncertainty in data, *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2020, vol. 86 (1), pp. 62–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-1-62-74>
15. Zhilin S. I., *Reliable Computing*, 2005, vol. 11, pp. 433–442. <https://doi.org/10.1007/s11155-005-0050-3>
16. Zhilin S. I., *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2007, vol. 88, no. 1, pp. 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2006.10.004>
17. Kumkov S. I., Processing of experimental data on ionic conductivity of molten electrolyte by methods of interval analysis, *Russian Metallurgy (METALLY)*, 2010, no. 3, pp. 79–89. (In Russ.)
18. Kumkov S. I., Mikushina Yu. V., *Reliable Computing*, 2013, vol. 19, pp. 197–214.
19. Nguyen H. T., Kreinovich V., Wu B., Xiang G., *Computing Statistics under Interval and Fuzzy Uncertainty. Applications to Computer Science and Engineering*, Springer, Berlin-Heidelberg, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-24905-1>

Статья поступила в редакцию 02.06.2022; одобрена после рецензирования 18.10.2022; принята к публикации 20.10.2022.
The article was submitted 02.06.2022; approved after reviewing 18.10.2022; accepted for publication 20.10.2022.

Научная статья

УДК 517.983.54:629.7.018.7

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-23-29>

Регуляризация задачи контроля состояний групповых объектов лётных испытаний

Иван Андреевич Кулешов

Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, Балашиха, Московская обл., Россия, ibnkuleshov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8046-9065>

Аннотация. Рассмотрена задача контроля технического состояния опытных образцов многоагентных систем. Проанализирована классическая процедура контроля применительно к групповым объектам испытаний нового типа – многоагентным системам. Установлено, что выполнение необходимого условия контроля – наблюдаемости состояний объекта испытаний применительно к многоагентной системе неочевидно, поскольку необходимо правильно детектировать каждый элемент объекта с достаточно высокой вероятностью. В противном случае результат контроля становится недостоверным, так как происходит смешение элементов вектора измеряемых параметров. Показано, что для группового объекта в качестве таких параметров выступают состояния его элементов. С целью обеспечения требуемой наблюдаемости и, следовательно, корректности задачи контроля предложено использовать в качестве регуляризаторов дополнительные высокоинформативные признаки. Поиск данных признаков производится в трёх направлениях: анализ гиперспектрального изображения элементов с поиском уникальных форм спектра, которые соответствуют материалам, характерным для того или иного элемента; анализ расположения данных материалов и возможности различной комбинации признаков формы спектра и расположения материалов; инфракрасный портрет элементов в среднем инфракрасном диапазоне для выделения характерных ярких областей, соответствующих расположению функциональной аппаратуры. Отмечено, что использование данных признаков с точки зрения обработки данных, поступающих от информационно-измерительных систем, требует определённой подготовки и, желательно, автоматизации. При автоматизации предложено применять однопроходные нейросетевые детекторы. Полученные результаты будут полезны при разработке системы сбора и анализа информации для испытаний опытных образцов многоагентных систем.

Ключевые слова: регуляризация, контроль состояний, многоагентная система, наблюдаемость, гиперспектр, нейросетевое детектирование, групповой объект испытаний

Для цитирования: Кулешов И. А. Регуляризация задачи контроля состояний групповых объектов лётных испытаний // Измерительная техника. 2022. № 12. С. 23–29. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-23-29>

Regularization of the problem of monitoring the states of group objects of flight test

Ivan A. Kuleshov

Peter the Great Military Academy of Strategic Rocket Troops, Balashikha, Moscow region, Russia, ibnkuleshov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8046-9065>

Abstract. The problem of monitoring the technical condition of prototypes of multi-agent systems is considered. The classical control procedure is analyzed in relation to a new type of group test objects - multi-agent systems. It has been established that the fulfillment of the necessary control condition - the observability of the states of the test object in relation to a multi-agent system is not obvious, since it is required to ensure a sufficiently high probability of correct detection of each element of the object. Otherwise, the control result becomes unreliable, since the elements of the vector of measured parameters are mixed. It is shown that for a group object, the states of its elements act as such parameters. In order to ensure the required observability and, consequently, the correctness of the control problem, it is proposed to use additional highly informative features as regularizers. The search for these signs is carried out in three directions: analysis of the hyperspectral image of elements with the search for unique forms of the spectrum corresponding to materials characteristic of a particular element; analysis of the location of these materials and the possibility of various combinations of these two features (the shape of the spectrum and the location of materials); infrared portrait of elements in the mid-IR range, in which characteristic bright areas can be distinguished, corresponding to the location of functional equipment. It is noted that the use of these features in terms of processing data from information-measuring systems requires some preparation and, preferably, automation. For automation, it is proposed to use single-pass neural network detectors. The results obtained will be useful in developing a system for collecting and analyzing information for testing prototypes of multi-agent systems.

Keywords: regularization, monitoring the state, multi-agent system, observability, hyperspectrum, neural network detection, group test object

Введение. В настоящее время многоагентность является одной из наиболее перспективных концепций развития робототехнических комплексов различного назначения. Под многоагентными системами понимаются системы с интеллектуальным управлением, элементами (агентами) которых являются однотипные устройства (роботы). Существует множество физических реализаций агентов. В качестве одной из наиболее актуальных можно выделить различные летательные аппараты, в частности беспилотные летательные аппараты с роевой организацией управления [1].

Теория многоагентных систем появилась примерно в 1961 г. и развивалась в работах школы коллективного поведения автоматов М. Л. Цетлина [2]. Несмотря на более чем полувековую историю, реальная возможность разработки многоагентных систем различных видов назрела только в последние годы одновременно с прорывом в сфере интеллектуального анализа данных. Развитие нейросетевых технологий в сферах управления [3] и распознавания образов [4–7] определило возможность автономного функционирования системы элементов (агентов) с самостоятельным выбором оптимальных стратегий поведения. К некоторым характерным особенностям многоагентных систем относятся автономность принятия решений, адаптация под окружающие условия, оперативность перераспределения задач между агентами, высокие эффективность и живучесть. При этом управление системой может быть как централизованным, осуществляемым назначенным «лидером», так и децентрализованным за счёт интеллектуальной самоорганизации [8].

Цель настоящей статьи – поиск рациональных путей регуляризации задачи контроля состояний групповых объектов лётных испытаний и формирование алгоритма их практического применения.

Наблюдаемость состояний группового объекта испытаний. Неотъемлемой частью разработки любой техники является проведение испытаний разного уровня. С этой точки зрения многоагентная система представляет собой групповой объект испытаний, в процессе применения реализующий некоторые системные свойства, недостижимые при испытаниях его элементов по отдельности. Так как описанные

реализации представляют собой множество летательных аппаратов, то далее рассмотрим именно лётные испытания.

Для оценки влияния группового объекта на процесс испытаний, изучим его составляющие (рис. 1). В процессе полёта объект испытаний находится в различных технических состояниях $ТС_1, ТС_2, \dots$, для их контроля необходимо получить опытную информацию о движении объекта, работе систем и агрегатов на борту, т. е. измерить множество параметров. Эту задачу решает измерительный комплекс ИК – совокупность функционально объединённых измерительных средств $ИС_1, ИС_2, \dots$, которые предназначены для получения информации о нормированных характеристиках объекта испытаний и параметрах условий испытаний. Полученную опытную информацию в виде значений множества измеряемых параметров $\{y\}$ обычно анализируют в автоматизированном режиме. Процесс автоматизированного анализа основывается на множестве заданных признаков $\{\pi\}$, отражающих техническое состояние объекта испытаний. Этот этап часто называют вторичной обработкой.

На основании полученных оценок ($\widehat{ТС}$) принимается одна из гипотез о соответствии H_0 или несоответствии H_1 испытываемого образца предъявляемым требованиям.

Перечисленные действия имеют смысл только при выполнении необходимого условия – наблюдаемости состояний объекта испытаний. Так как, в отличие от задачи измерений, задача контроля является обратной с точки зрения причинно-следственных связей, в неё априори закладывается определённая некорректность. Возникновение задачи контроля наглядно можно показать, используя понятие матричного критерия наблюдаемости: если S – вектор состояний размерности n , Y – вектор наблюдаемых параметров размерности r и $C: S \rightarrow Y$ – оператор контроля (матрица контроля размерности $r \times n$), тогда $Y = CS$. Если наблюдаемых параметров достаточно для достоверной оценки состояния, то должна существовать обратная матрица C^{-1} . В общем случае число наблюдаемых параметров больше числа состояний, поэтому матрица C как правило прямоугольная, а значит операция обращения заменяется на псевдообращение:

$$C^T Y = C^T C S;$$

$$S = [C^T C]^{-1} C^T Y. \quad (1)$$

Очевидно, что (1) имеет решение, только если матрица $[C^T C]$ неособенная, т. е.

$$\det[C^T C] \neq 0.$$

Для летательных аппаратов – элементов группового объекта испытаний – выполнение этого условия обеспечивается на этапе проектирования системы контроля. По техническим состояниям элементов контролируются состояния группового объекта в целом. Согласно иерархии этой системы, состояния элементов можно назвать состояниями нижнего уровня, а состояния группового объекта – верхнего уровня и обозначить их как S_1, S_2 соответственно. Для

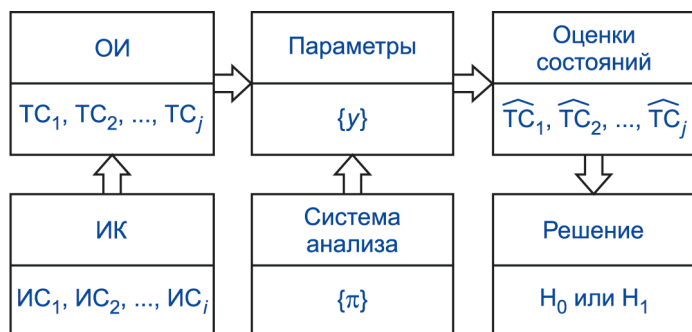


Рис. 1. Процесс испытаний группового объекта

Fig. 1. Group object testing process

удобства записи обозначим C_1, C_2 результирующие матрицы контроля $[C^T C]^{-1}$, тогда

$$S_2 = C_2 [S_{1,1}, S_{1,2}, \dots, S_{1,N}] = C_2 [C_1 Y_1, C_1 Y_2, \dots, C_1 Y_N],$$

где N – число элементов.

Положения элементов матрицы C_2 зафиксированы и соответствуют элементам вектора состояний нижнего уровня, следовательно, корректность контроля напрямую зависит от распознавания элементов группового объекта испытаний в процессе сеанса измерений.

Оптические средства, используемые в настоящее время для внешнетраекторных измерений, не предназначены для распознавания большого числа элементов в кадре [9]. Исключение составляют оптико-электронные системы патрульного типа, однако при этом объекты в кадре распознаёт специально обученный оператор. Специфика построения и функционирования опытных образцов многоагентных систем явно исключает такую возможность, поскольку в процессе полёта элементы системы постоянно перемещаются относительно друг друга, в том числе с пересечением проецируемых траекторий. Таким образом, условие наблюдаемости в общем случае неочевидно и задача контроля становится некорректной.

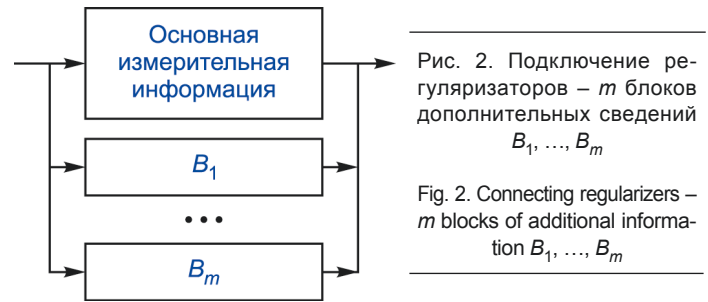
Регуляризация задачи контроля состояний. Существуют различные методы регуляризации некорректных задач – метод сужения множества решений до класса корректности, метод квазирешений и метод регуляризующих алгоритмов (регуляризаторов) [10]. Важный вклад в разработку этих методов внесли Ж. Адамар, А. Н. Тихонов, М. М. Лаврентьев, В. К. Иванов, В. А. Винокуров и др. Известно формализованное решение данной задачи относительно наблюдаемости состояний на основе принципа информационной избыточности [11]. Оно заключается в расширении множества измеряемых параметров и (на их основе) пространства признаков. Эту операцию можно графически представить, как параллельное подключение регуляризаторов – блоков дополнительных сведений об объекте испытаний (рис. 2).

Предположим, что каждый блок в равной степени устраняет некорректность задачи контроля, тогда вероятность правильного принятия решения P_p запишем в виде

$$P_p = 1 - (1 - P_6)^m,$$

где P_6 – вероятность регуляризации при использовании одного блока дополнительных сведений; m – число блоков дополнительных сведений.

Описанный в [11] принцип применим и в случае группового объекта испытаний. Существует множество факторов некорректности: метрологический, связанный с недостаточной точностью измерительных приборов; алгоритмический, вызванный погрешностью алгоритмов обработки информации; методический, обусловленный несовершенством методов сбора и обработки и др. Приняв во внимание опыт работы системы полигонных испытаний, накопленный при испытаниях описанных элементов группового объекта,



предположим, что эти факторы в большей степени уже учтены и заблаговременно устранены. Однако, как отмечено ранее, в задаче контроля состояния группового объекта в целом некорректность прежде всего выражается в неполноте или неправильности распознавания его элементов. Таким образом, вероятность правильного принятия решения можно переписать в виде

$$P_p \leq \prod_{n=1}^N P_{3n},$$

где P_{3n} – вероятность распознавания n -го элемента в кадре.

Если считать события, заключающиеся в распознавании различных элементов, равновероятными, а влияние прочих факторов некорректности существенно менее сильным, то справедливо примерное равенство

$$P_p \approx P_3^N. \quad (2)$$

Учтём, что распознавание каждого элемента происходит за счёт привлечения m дополнительных сведений P_6 и запишем формулу (2) как

$$P_p \approx [1 - (1 - P_6)^m]^N. \quad (3)$$

Решив выражение (3) относительно m , получим требуемое число дополнительной измерительной информации, необходимой для регуляризации задачи контроля состояний группового объекта с N элементами при заданных уровнях P_p, P_6 :

$$m \approx \log_{(1-P_6)} (1 - \sqrt[N]{P_p}). \quad (4)$$

На рис. 3 приведён график зависимости требуемого числа дополнительных сведений от вероятности P_6 при различных уровнях P_p и $N=20$. Согласно рис. 3 чем более информативен блок дополнительных сведений, тем меньшее число блоков требуется для достижения необходимой вероятности правильного принятия решения. Так, при $P_6=0,92$ достаточно всего трёх блоков дополнительной информации даже при $P_p=0,99$ с учётом большого числа элементов группового объекта испытаний.

Вероятность правильного принятия решения всегда ограничена сверху вероятностями ошибок 1-го α и 2-го β рода:

$$P_p = 1 - (\alpha + \beta), \quad (5)$$

доверительные уровни которых, как правило, принимаются равными 0,02, 0,05 или 0,1. Если α , β установлены как равновероятные, то максимальный теоретически достижимый уровень P_p принадлежит отрезку

$$0,80 \leq P_p \leq 0,96.$$

В пределах данного отрезка число m дополнительных блоков будет менее десяти, даже при P_6 , равном 0,36 и 0,43 соответственно (см. рис. 3).

Источники высокоинформативных признаков. Поиск описанных высокоинформативных сведений об элементах группового объекта испытаний может базироваться на их физической природе, а также на закладываемых функциональных особенностях летательного аппарата того или иного типа. В частности, можно использовать сведения о специфических формах спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) видимого спектра, отражённого от различных материалов планера летательного аппарата (блок B_1 дополнительных сведений). Кроме того, само расположение этих материалов (блок B_2 дополнительных сведений) также может быть весьма информативно при решении задачи распознавания. Форму СПЭЯ в видимом диапазоне

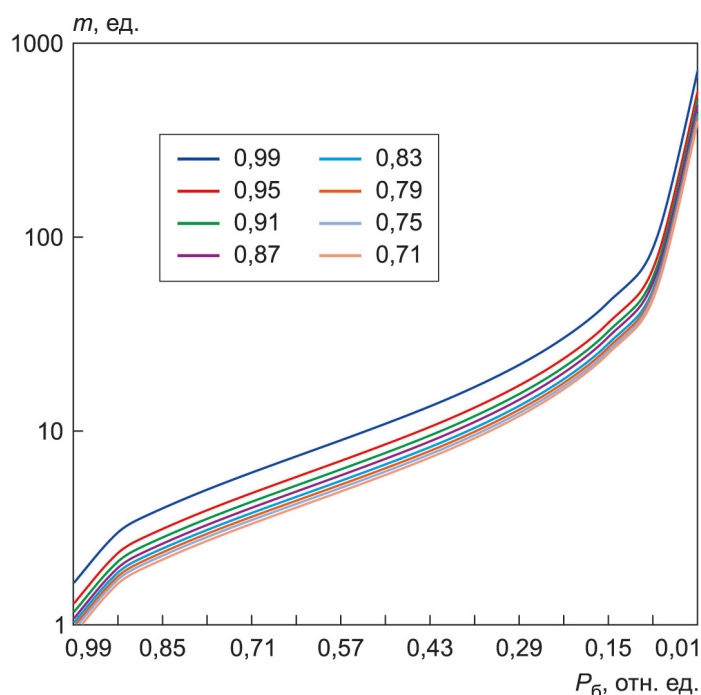


Рис. 3. Кривые регуляризации – зависимости требуемого числа m блоков дополнительных сведений от вероятности P_6 регуляризации при использовании только одного блока дополнительных сведений для вероятностей $P_p = 0,71; 0,75; 0,79; 0,83; 0,87; 0,91; 0,95; 0,99$ отн. ед.

Fig. 3. Regularization curves – the dependence of the required number m of additional information on the probability P_6 of regularization when using one block of additional information for probabilities $P_p = 0.71; 0.75; 0.79; 0.83; 0.87; 0.91; 0.95; 0.99$ rel. units

волн можно получить, проведя гиперспектральный (ГС) анализ элементов группового объекта испытаний. В этой связи целесообразно рассмотреть, что такое ГС-изображения и как они формируются.

В отличие от трёхканальных (red-green-blue, RGB) или мультиспектральных (10–15 каналов) изображений, ГС-изображения состояются несколькими сотнями узкополосных фильтров по 5–10 нм каждый [12]. Такая плотность фильтрации позволяет составлять квазинепрерывный спектр оптического сигнала, излучённого объектом. Различные материалы по-разному отражают и поглощают световое излучение, что проявляется в пиках и провалах их СПЭЯ [13]. Другими словами, по ГС-изображению какого-либо объекта можно сделать достоверное предположение о материалах, входящих в его состав.

Если групповой объект испытаний имеет гетерогенную структуру, то различия материалов определить достаточно легко. С гомогенными группами ситуация более сложная, они состоят из однотипных многофункциональных аппаратов, роли которых внутри группы распределяются исходя из текущей обстановки. В таком случае целесообразно искусственно разметить элементы группы материалами, не оказывающими влияние на аэродинамические свойства летательного аппарата. При этом, как уже было отмечено ранее, качество распознавания может повысить расположение уникальных материалов на элементах, за счёт этого признака можно сократить число вариаций дополнительных материалов.

Поскольку ГС-изображение в чистом виде представляет собой достаточно громоздкий куб данных, по результатам предварительного анализа необходимо выделить только те поддиапазоны, которые отражают максимальные различия между формами СПЭЯ. Решение этой задачи вручную достаточно проблематично ввиду большого объёма анализируемой информации, поэтому целесообразно применить анализ главных компонент.

В качестве ещё одного блока дополнительных сведений (B_3) может выступать информация о характерных областях нагрева, соответствующих местам расположения функциональной аппаратуры $\{D(l_{\max}, T)\}$ (где D – область планера, подверженная нагреву; $l_{\max}$ – длина волны, на которой достигается пик инфракрасной (ИК) светимости при температуре T). Для того чтобы понять, на каких длинах волн регистрировать это тепловое излучение, воспользуемся законом смещения Вина:

$$\lambda_{\max} T = b; \quad \lambda_{\max} = b/T,$$

где T – температура области нагрева в кельвинах; $b = 0,002897771955$ м·К – постоянная смещения Вина.

Логично было бы предположить, что максимальная температура нагрева функциональной аппаратуры не превышает 100 °С, следовательно $\lambda_{\max} = 7,77$ мкм. По определению Международной комиссии по освещённости¹ такая длина волны относится к диапазону IR-C, который уточняет

¹ International Commission on Illumination: [сайт]. URL: <https://cie.co.at/eilvterm/17-21-007> (дата обращения: 18.11.2022).

международный стандарт ISO 20473:2007² как средний (MIR) ИК-диапазон.

Таким образом, в результате ГС- и ИК-анализов получено некоторое множество снимков, соответствующих характерным поддиапазонам СПЭЯ, а также изображения с максимальной светимостью, соответствующей пику ИК-излучения в среднем диапазоне. При этом все снимки выполнены в оттенках серого, т. е. с глубиной цвета 8 бит. В совокупности эти данные достаточно трудно обработать даже хорошо обученному оператору в силу их многомерности, поэтому имеет смысл их перекодировать в более удобную форму, например, RGB. Для этого каждому вектору значений СПЭЯ $\mathbf{G}_M = [g(\lambda_1), g(\lambda_2), \dots, g(\lambda_i)]$, где i – число выбранных поддиапазонов ГС, соответствующих уникальному материалу M конструкции летательного аппарата, присвоим индекс Idx_G по порядку. Далее сформируем вектор номеров пикселей $\mathbf{Num}_G = [np_1, np_2, \dots, np_j]$, в которых содержатся указанные векторы $\mathbf{G}_M$. Элементы каждой из трёх RGB-матриц изображения имеют допустимые значения в диапазоне 0–255. Для того чтобы обеспечить максимальный цветовой контраст, каждый пиксел из векторов $\mathbf{Num}_G$ закодируем во встречном порядке между двумя матрицами (например, R и B):

$$R(\mathbf{Num}_G) = \text{floor}\left(\frac{255}{Nidx} Idx_G\right);$$

$$B(\mathbf{Num}_G) = \text{floor}\left(\frac{255}{Nidx} (Nidx - Idx_G + 1)\right),$$

где $Nidx$ – количество индексов; floor – отбрасывает дробную часть.

Оставшуюся матрицу G можно использовать для записи ИК-изображения. В итоге получаем адаптированное для оператора RGB-изображение, отражающее и уникальные материалы (маркеры) и тепловизионную составляющую.

Итоговое число блоков $m = 3 (B_1, B_2, B_3)$, следовательно, согласно рис. 3 эти блоки должны быть достаточно высокоинформативными. Например, для заданных диапазонов P_p при $N = 7$ вероятности блоковой регуляризации находятся в диапазоне

$$0,685 \leq P_6 \leq 0,820.$$

Напрямую оценить P_6 затруднительно, однако косвенно вклад всех дополнительных сведений выражается в вероятности P_3 , требуемое значение P_3^{TP} которой для данного примера можно получить с учётом (1):

$$0,969 \leq P_3 \leq 0,994.$$

Если в результате экспериментальной проверки $P_3^{TP} > P_3$, то необходимо повысить информативность указанных блоков. Очевидно, что это действие применимо только к блокам B_1, B_2 , поскольку увеличить информативность в ИК-канале можно только путём дополнительного нагрева некоторых областей планеров, что, очевидно, нецелесообразно.

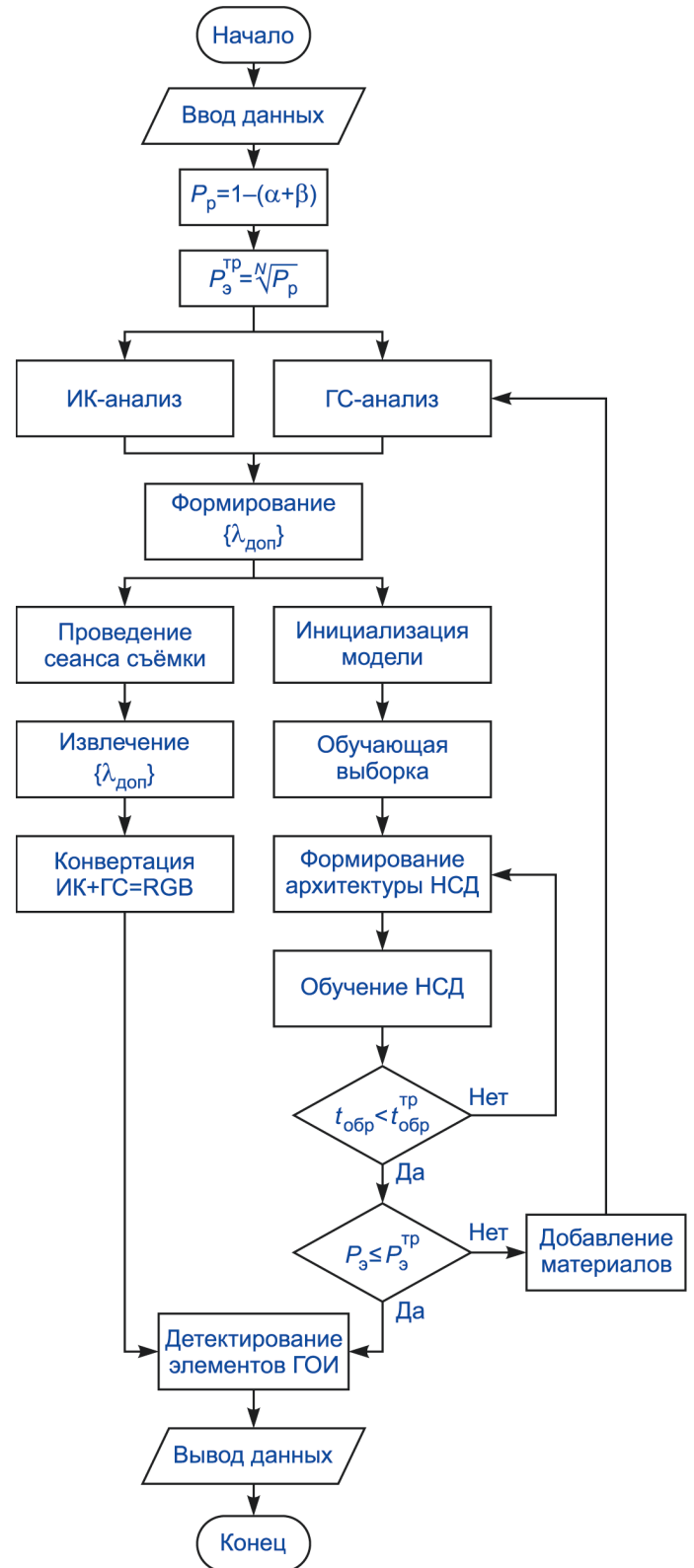


Рис. 4. Алгоритм регуляризации (НСД – нейросетевой детектор; ГОИ – групповой объект испытаний)

Fig. 4. Regularization algorithm (NND – neural network detector; GTO – group test object)

² ISO 20473:2007. Optics and photonics – Spectral bands.

Таким образом, можно предложить следующий порядок проведения процедуры по увеличению информативности:

выбрать один новый материал;

выполнить ГС-анализ материала, по его результатам принять решение об отличии формы его спектра от спектров уже выбранных материалов;

определить области нанесения выбранного материала, специфичные для каждого элемента;

нанести материал в указанных областях.

После выполнения процедуры для всех элементов необходимо снова экспериментально оценить P_3 .

Автоматизация детектирования. Так как до сих пор детектирование объектов предполагалось проводить вручную, а групповой объект испытаний может содержать достаточно большое число элементов, работа оператора по выставлению меток может оказаться весьма долгой. Например, при $N=10$, стандартной скорости съёмки 25 кадров в секунду и продолжительности сеанса 5 мин необходимо выставить 75000 меток. Даже если выставление каждой займёт всего 2 с (за которые нужно детектировать объект, выставить метку и выбрать из выпадающего списка её номер), на всю обработку потребуется 41,6 ч рабочего времени, т. е. на 1,6 ч больше одной рабочей недели. При этом за всё время обработки оператор не должен допустить случайных ошибок, связанных с невнимательностью или снижением остроты восприятия на фоне монотонной работы. Очевидно, что требуется повысить оперативность обработки измерительной информации, а также исключить влияние человеческого фактора за счёт автоматизации детектирования элементов группового объекта испытаний.

В процессе сеанса съёмки элементы группового объекта совершают взаимные относительные перемещения и вращательные движения, что аналогично аффинным преобразованиям проецируемых изображений. Даже обладая информацией о ГС-разметке летательного аппарата, формализовать задачу детектирования в описанных условиях весьма сложно. Однако существует достаточно мощный класс инструментов, который при правильной настройке способен справиться с такой задачей – нейросетевые детекторы (НСД).

Подробно решение задачи нейросетевого детектирования группового объекта с использованием дополнительных сведений из гиперспектра рассмотрено в [14] и показано, что существует принципиальная возможность нейросетевого детектирования элементов с требуемым качеством с помощью однопроходного детектора типа YOLO v2. Для этого настройка гиперпараметров (параметров, не оптимизируемых в процессе обучения) должна соответствовать необходимой оперативности обработки, а качество обучения – вероятности правильного распознавания на уровне не ниже P_3^{TP} . Если правильно организованный процесс обучения не даёт требуемых результатов, то принимается решение о необходимости повышения информативности в соответствии с описанной процедурой.

Обобщив все описанные решения, составим алгоритм их практического применения (алгоритм регуляризации), приведённый на рис. 4, где $\lambda_{доп}$ – дополнительные поддиапазоны длин волн, полученные в результате ГС- и ИК-анализов; $t_{обр}$ – время обработки входного изображения нейродетектором.

Заключение. Таким образом, актуализирована проблематика регуляризации задачи контроля состояний опытных образцов многоагентных систем и представлен пример использования новых высокоинформативных данных о групповом объекте испытаний, обеспечивающих качественное детектирование его элементов и, как следствие, наблюдаемость состояний. Так как вводимая информационная избыточность оказывает непосредственное влияние на оперативность обработки информации, предложен вариант её автоматизации с применением нейросетевого детектора. Совокупность указанных предложений сформулирована в виде алгоритма регуляризации.

Список источников

1. Городецкий В. И., Карсаев О. В., Самойлов В. В., Себряков С. В. Прикладные многоагентные системы группового управления // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 2. С. 3–24.
2. Цетлин М. Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. М.: Наука, 1969. 316 с.
3. Чернодуб А. Н., Дзюба Д. А. Обзор методов нейрорегуляризации // Проблемы программирования. 2011. № 2. С. 79–94. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.05506>
4. Ren S., He K., Girshick R., and Sun J., *Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.01497>
5. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A., *You only look once: Unified, Real-Time Object Detection*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.02640>
6. Wei Liu, Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Cheng-Yang Fu, Berg A. C., *SSD: Single Shot MultiBox Detector*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.02325>
7. Redmon J., Farhadi A., *YOLO9000: Better, Faster, Stronger*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.08242>
8. Ерофеева В. А., Иванский Ю. В., Кияев В. И. Управление роем динамических объектов на базе мультиагентного подхода // Компьютерные инструменты в образовании. 2015. № 6. С. 34–42.
9. Додонов А. Г., Пуятин В. Г. Наземные оптические, оптико-электронные и лазерно-телевизионные средства траекторных измерений // Математические машины и системы. 2017. № 4. С. 30–56.
10. Лисковец О. А. Теория и методы решения некорректных задач // Итоги науки и техники. 1982. Т. 20. С. 116–178.
11. Потюпкин А. Ю. Контроль технического состояния сложных объектов на основе принципа информационной избыточности // Измерительная техника. 2015. № 2. С. 27–31.
12. Антонова В. А. Возможности гиперспектрального дистанционного зондирования // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2019. № 11-2. С. 35–38.
13. Barnabe P., Dislaire G., Leroy S., Pirard E., *Journal of Electronic Imaging*, 2015, no. 24, 061115. <https://doi.org/10.1117/1.JEI.24.6.061115>

14. Кулешов И. А. Нейросетевое детектирование групповых объектов испытаний по гиперспектральным маркерам при внешнетраекторных измерениях // Измерительная техника. 2022. № 3. С. 17–23.
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-3-17-23>

References

1. Gorodetskii V. I., Karsaev O. V., Samoilov V. V., Serebryakov S. V., *Scientific and Technical Information Processing*, 2010, vol. 37 no. 5, pp. 301–317.
<https://doi.org/10.3103/S0147688210050060>
2. Tsetlin M. L. *Issledovaniya po teorii avtomatov i modelirovaniyu biologicheskikh system* [Research of the theory on automata and modeling of biological systems], Moscow, Nauka Publ., 1969, 316 p. (In Russ.)
3. Chernodub A. N., Dziuba D. A., *Problems in Systems Programming*, 2011, no. 2, pp. 79–94. (In Russ.)
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.05506>
4. Ren S., He K., Girshick R., and Sun J., *Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.01497>
5. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A., *You only look once: Unified, Real-Time Object Detection*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.02640>

6. Wei Liu, Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Cheng-Yang Fu, Berg A. C., *SSD: Single Shot MultiBox Detector*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.02325>
7. Redmon J., Farhadi A., *YOLO9000: Better, Faster, Stronger*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.08242>
8. Erofeeva V. A., Ivanskii Yu. V., Kiyaev V. I., Swarm control of dynamic objects based on multi-agent technologies, *Komp'yuternye instrumenty v obrazovanii*, 2015, no. 6, pp. 34–42 (In Russ.)
9. Dodonov A. G., Putyatin V. G., *Matematicheskie mashiny i sistemy*, 2017, no. 4, pp. 30–56 (In Russ.)
10. Liskovets O. A., *J. Math. Sci.*, 1986, vol. 34, no. 3, pp. 1656–1696. <https://doi.org/10.1007/BF01262408>
11. Potyupkin A. Yu., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 149–156.
<https://doi.org/10.1007/s11018-015-0677-3>
12. Antonova V. A., Hyperspectral remote sensing opportunities, *Sovremennaya nauka: Aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 11-2, pp. 35–38. (In Russ.)
13. Barnabe P., Dislaire G., Leroy S., Pirard E., *Journal of Electronic Imaging*, 2015, no. 24, 061115.
<https://doi.org/10.1117/1.JEI.24.6.061115>
14. Kuleshov I. A., *Measurement Techniques*, 2022, vol. 65, no. 3, pp. 166–173.
<https://doi.org/10.1007/s11018-022-02064-x>

Статья поступила в редакцию 28.09.2022; одобрена после рецензирования 18.10.2022; принята к публикации 20.10.2022.
 The article was submitted 28.09.2022; approved after reviewing 18.10.2022; accepted for publication 20.10.2022.

Разработка и апробация методики непрерывного измерения массы образцов диэлектрических материалов при микроволновой термообработке

Егор Владимирович Матвеев^{1✉}, Валентин Викторович Берестов²

^{1, 2} Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий, Москва, Россия

¹maegor@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0002-8666-1170>

²vberestov97@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5158-1963>

Аннотация. Рассмотрены методы непрерывного измерения массы образцов диэлектрических материалов в процессе микроволновой термообработки на частоте 2,45 ГГц. Показано, что непосредственное измерение массы образца электронными весами в ходе микроволновой обработки затруднено, поскольку внутри рабочей камеры невозможно использовать проводящие материалы из-за наводок в них токов, искажающих результаты измерений. Предложена методика непрерывного измерения массы образцов диэлектрических материалов при микроволновой термообработке. Методика основана на методах термогравиметрического анализа. Разработана оригинальная измерительная система, реализующая указанную методику и состоящая из отдельных модулей: находящегося внутри рабочей камеры подвеса с образцом и расположенных снаружи камеры тензодатчика, спектрометра и систем обработки и преобразования сигнала. Применение модульной компоновки позволяет максимально удалить измерительную систему от источника электромагнитного излучения, избежать искажения сигнала и изолировать измерительное оборудование от микроволнового воздействия. Разработанная методика непрерывного измерения массы образцов при микроволновой термообработке апробирована, и получены зависимости изменения массы, которые позволили выявить два характерных этапа карбонизации материала, различающихся скоростью изменения массы образца. Суммарная погрешность методики составляет менее 1 %, при этом основной вклад в погрешность вносит ошибка квантования при аналого-цифровом преобразовании. Предложенную методику можно применять при работе систем автоматизированного управления процессами микроволновой обработки материалов.

Ключевые слова: измерения массы, диэлектрический материал, микроволновая термообработка, термогравиметрия, спектральная пирометрия, тензодатчик, хлопковый пух

Финансирование: исследования проведены в ФГБНУ «Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий» в рамках государственного задания 2022 г. по проекту FNER-2022-0002.

Для цитирования: Матвеев Е. В., Берестов В. В. Разработка и апробация методики непрерывного измерения массы образцов диэлектрических материалов при микроволновой термообработке // Измерительная техника. 2022. № 12. С. 30–34. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-30-34>

Development and testing of a method for continuous mass measurement dielectric materials samples during microwave heat treatment

Egor V. Matveev^{1✉}, Valentin V. Berestov²

^{1, 2} Research Institute of Advanced Materials and Technology, Moscow, Russia

¹maegor@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0002-8666-1170>

²vberestov97@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5158-1963>

Abstract. The paper considers methods of continuous measurement of dielectric material samples mass during microwave heat treatment at a frequency of 2.45 GHz. It is known that the direct measurement of the sample mass by electronic scales during microwave treatment is a complex problem. The main limiting factor is the difficulty of using conductive materials inside the working chamber due to the induction of currents in them, which distort the measurement results. The paper proposes a technique for continuously measuring the mass of dielectric material samples during microwave heat treatment. The technique is based on thermogravimetric analysis methods. We developed an original measuring system based on the theoretical technique. It consists of separate modules – a hanger with a sample (inside the working chamber) and a strain gauge, a spectrometer and signal processing and conversion systems (all outside the chamber). The use of a modular layout has a number of advantages. It allows the measuring system to be as far away as possible from the source of electromagnetic radiation. Therefore, it allows to avoid signal distortion and isolate the measuring equipment from microwave influence. The developed technique of continuous measurement of sample mass during microwave heat treatment was tested. The dependences of mass changes were obtained.

These dependencies revealed two characteristic stages of material carbonization which differ in the rate of change in sample mass. The total error of the technique is less than 1 %. The quantization error makes the main contribution to the error in the analog-to-digital conversion. The proposed technique can be used in automated control systems for microwave processing of materials.

Keywords: mass measurements, dielectric material, microwave heat treatment, thermogravimetry, spectral pyrometry, strain gauge, cotton linter

Financial Support: the research was carried out at the Research Institute of Advanced Materials and Technology in the framework of the state task of 2022 under the project FNER-2022-0002.

Введение. Совершенствование методов непрерывного измерения массы изделий в процессе микроволновой термообработки является актуальной задачей для химической и обрабатывающей промышленности при решении различных задач: спекания неорганических порошков, обработки руды, сушки материалов, приготовления катализаторов, переработки полимеров и пр. [1–6]. Классические методы термогравиметрического анализа подробно описаны и широко применяются в настоящее время. Однако специфика термообработки в сильных микроволновых полях требует особых методов измерения массы из-за необходимости экранирования средств измерений, устранения возможных искажений распределения поля, вносимых измерительным оборудованием, а также из-за сложности использования термпар вследствие сильных наводок на них [7].

Под микроволновым воздействием на материал в настоящей работе понимаем тепловое действие энергии электромагнитных волн частотой 2,45 ГГц, в результате которого часть этой энергии рассеивается внутри материала, нагревая его. В ходе нагрева масса материала может изменяться, что связано с химическими превращениями при повышении температуры.

Термогравиметрический анализ (ТГА) – метод термического анализа, при котором регистрируется изменение массы образца в зависимости от температуры и/или времени [8]. Часто совместно с ТГА применяется метод деривативной термогравиметрии. В рамках этого метода численным дифференцированием определяется производная от ТГА-сигнала (скорость изменения массы), что позволяет установить момент времени или температуру, при которой изменение массы происходит наиболее быстро [9]. ТГА – сравнительно недорогой, быстродействующий и простой в использовании метод определения температуры деградации биополимеров (в частности, целлюлозосодержащих), влажности материалов, доли органических и неорганических компонентов, входящих в состав исследуемого вещества [10].

В источниках [1–6, 11] широко представлены различные варианты реализации методов ТГА для решения различных задач высокотемпературной микроволновой обработки материалов.

При непрерывном измерении массы в ходе микроволнового нагрева существует ряд трудностей. В частности, из-за искажения показаний вследствие наводок электронные весы необходимо размещать вне рабочей зоны микроволновой камеры. В этом случае необходимо обеспечить передачу усилия, создаваемого весом обрабатываемого образца, на весы. В работе [4] предложен вариант решения задачи,

закрывающийся в том, что подложка с расположенным на ней образцом закреплена на одном конце вертикально расположенного стержня из диэлектрического материала, проходящего через отверстие в дне микроволновой камеры и опирающегося другим концом на платформу весов. Однако при такой схеме возможны погрешности измерения массы, обусловленные возможным отклонением стержня от вертикального положения. Кроме того, в данной схеме возможен выход паразитного микроволнового излучения через отверстие для ввода стержня, поскольку стержень и отверстие, по сути, образуют волновод, частично заполненный диэлектриком.

Цель настоящего исследования заключается в разработке методики и измерительной системы непрерывного измерения массы образцов диэлектрических материалов при микроволновой термообработке. Методика основана на методах ТГА и позволяет контролировать температуру методами спектральной пирометрии. Предлагаемая система состоит из отдельных модулей: подвеса с образцом, тензодатчика, спектрометра и систем обработки и преобразования сигнала. Модульная компоновка позволяет максимально удалить измерительную систему от источника электромагнитного излучения, и таким образом одновременно избежать искажения сигнала и изолировать измерительное оборудование от микроволнового воздействия.

Методика измерения массы при микроволновой термообработке. Для передачи создаваемого образцом усилия на платформу весов в настоящей работе предложена и реализована следующая схема: образец располагают на кварцевой подставке, подвешенной на базальтовых нитях к балке тензодатчика, который размещён на верхней стенке микроволновой камеры. Тензодатчик одноточечного типа (Beijing XNQ Electric Co, КНР), класс точности С3 по ГОСТ 8.631-2013 (OIML R 60:2000)¹, наибольший предел измерения 30 г, рабочий коэффициент передачи $(0,5 \pm 0,05)$ мВ/В, комбинированная погрешность не более $\pm 0,02$ % максимального измеряемого значения.

Несмотря на то, что базальтовые волокна могут иметь диэлектрические потери (тангенс угла диэлектрических потерь примерно 0,01 в диапазоне частот 1–6 ГГц [12]), по сравнению с аналогичными стекловолокнами и волокнистыми полимерными материалами они обладают лучшими механическими свойствами [13], устойчивостью к растворам щелочей и кислот, а также к высоким (более 800 °С) температурам и открытому пламени [14], что делает их пригодными для применения в качестве подвеса при изучении процессов в агрессивных средах и при повышенных температурах.

¹ ГОСТ 8.631–2013 (OIML R 60:2000). ГСИ. Датчики весоизмерительные. Общие технические требования. Методы испытаний.

Отверстие для ввода нити в камеру можно рассматривать как отрезок запердельного волновода круглого сечения диаметром d и длиной l , равными 3 мм, для рабочей частоты источника микроволновой энергии $f=2,45$ ГГц. При этом электромагнитная волна, проходящая через отверстие наружу, испытывает ослабление порядка 30 дБ по мощности [15]. Для увеличения ослабления, например до 60 дБ, можно дополнительно использовать штучер в виде запердельной трубки диаметром 3 мм и длиной 6 мм. Использование в качестве передаточного звена диэлектрического стержня, описанного в работе [4], приводит к увеличению критической длины волны такого запердельного волновода, уменьшению вносимого ослабления излучаемой из камеры микроволновой энергии и увеличению мощности паразитного микроволнового излучения почти вдвое [15].

Экспериментальная установка. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Микроволновая камера 1 выполнена в форме полого куба со стороной 600 мм, в центре верхней стенки которого установлен источник микроволновой энергии магнетронного типа со встроенным блоком питания и панелью управления 2. Также в верхней стенке на небольшом расстоянии от источника выполнено отверстие диаметром 3 мм для пропускания нити подвеса, с помощью которой кварцевая подставка с образцом 10 закрепляется на

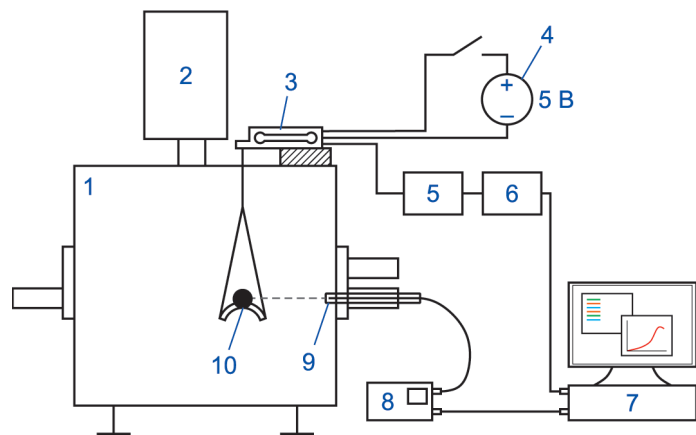


Рис. 1. Схема установки для определения изменения массы образца в процессе микроволновой термообработки с помощью тензодатчика и измерения температуры образца методом спектральной пирометрии:

1 – микроволновая камера; 2 – источник микроволновой энергии магнетронного типа; 3 – тензодатчик; 4 – источник питания; 5 – модуль аналого-цифрового преобразователя; 6 – микроконтроллер; 7 – персональный компьютер; 8 – спектрометр; 9 – оптический зонд спектрометра; 10 – кварцевая подставка с образцом

Fig. 1. Diagram of an experimental setup for detecting changes in the sample's mass during microwave heat treatment using a strain gauge and measuring the sample's temperature via spectral pyrometry:

1 – microwave chamber; 2 – magnetron type microwave energy source; 3 – strain gauge; 4 – power supply; 5 – analog-digital converter module; 6 – microcontroller; 7 – personal computer; 8 – spectrometer; 9 – spectrometer optical probe; 10 – quartz support with sample

балке тензодатчика 3. Для измерения потери массы образца Δm в процессе микроволновой обработки к тензодатчику прикладывается постоянное электрическое напряжение 5 В от источника 4, а выходной сигнал с тензодатчика снимается с помощью модуля аналого-цифрового преобразователя 5, подвергается предварительной обработке микроконтроллером 6 и далее передается на персональный компьютер 7 для его дальнейшей обработки специализированной программой CoolTerm (Roger Meier, сайт: <http://freeware.the-meiers.org/>). Изменение выходного напряжения тензодатчика прямо пропорционально приложенной нагрузке.

Одновременно с измерением Δm во время микроволновой карбонизации измеряется температура образца методом спектральной пирометрии [16] спектрометром HR 2000+ (Ocean Optics, США) в диапазоне ближнего инфракрасного излучения (650–1080 нм) 8 с оптическим зондом 9, направленным на образец. Полученные интенсивности теплового излучения образца обрабатываются непрерывно (время интегрирования $\tau=0,12$ с) в программе Multi Spectral Pyrometry (собственная разработка ФГБНУ «НИИ ПМТ», автор Тимченко Н. И.). Наименьшее значение температуры, фиксируемой методом спектральной пирометрии с используемым оборудованием, составляет около 400 °С.

Источники погрешностей при непрерывном измерении массы образцов. При непрерывных измерениях массы тензодатчик может быть причиной возникновения дополнительной погрешности из-за влияния на него температуры и электромагнитных полей. Однако нагрев тензодатчика, обусловленный конвективной передачей тепла от карбонизируемого образца в условиях естественной конвекции внутри микроволновой камеры, в ходе эксперимента не превышает верхнего предела термокомпенсации тензодатчика (40 °С). В то же время, применяемое для нагрева образца микроволновое излучение не оказывает существенного влияния на результаты измерений тензодатчиком, поскольку отверстие для ввода нити (диаметром 3 мм) является запердельным волноводом для данной длины волны (122,5 мм при частоте 2,45 ГГц), многократно понижающим мощность проходящего через него излучения. Таким образом, погрешности из-за воздействия температуры и электромагнитных полей в условиях данного эксперимента полагаются незначительными и не влияющими на результаты измерений массы.

Построение градуировочной кривой тензодатчика. Предварительно тензодатчик откалиброван по следующему алгоритму. На балке тензодатчика на базальтовых нитях подвешена подставка, на которую последовательно установлены грузики-разновесы из стандартного набора Г-2-210 (Госметр), класс точности 2 (ГОСТ 7328-82²), один или несколько, для достижения нужной массы – 0, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000 мг. Для каждой из указанных масс разновесов определено выходное электрическое напряжение тензодатчика. По полученным данным построена градуировочная зависимость $V_{\text{вых}}(m_p)$ напряжения

² ГОСТ 7328-82. Меры массы общего назначения и образцовые. Технические условия.

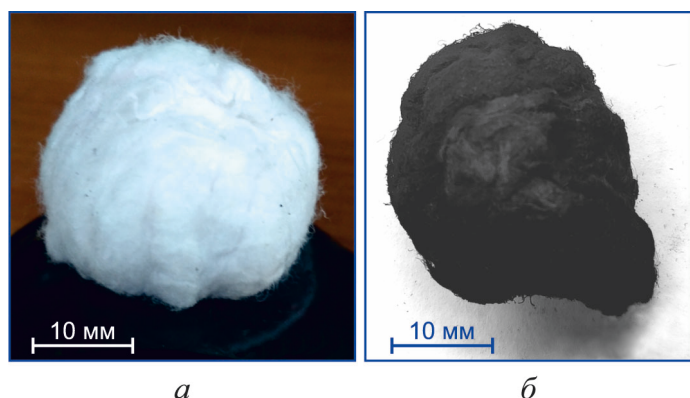


Рис. 2. Исходный (некарбонизированный) (а) и карбонизированный (б) образцы хлопкового пуха

Fig. 2. Initial (non-carbonized) (a) and carbonized (b) samples of cotton lint

от массы разновесов в виде $V_{\text{вых}} = 5,57 \cdot 10^{-8} m_p + 1,12 \cdot 10^{-3}$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,999$.

Карбонизация образца хлопкового пуха. Для апробации разработанной методики непрерывного измерения массы образцов диэлектрических материалов при микроволновой термообработке проведена карбонизация образца хлопкового пуха. Процесс карбонизации происходит при высоких (более 400 °C) температурах с постоянным изменением массы исходного материала. Для изготовления образца хлопковый пух обработан специальным раствором, из него сформирован шарик диаметром 30 мм и массой $m = 10,020$ г (рис. 2). Карбонизация произведена на подвесе в воздушной среде при максимальной мощности микроволнового поля в течение 180 с. Конечная масса образца составила 0,389 г. В результате карбонизации образца хлопкового пуха при микроволновой термообработке получены временные зависимости его массы $m(t)$ и температуры $T(t)$ (рис. 3).

Разработанная методика непрерывного измерения массы позволила выявить два основных этапа карбонизации образца, характерными признаками которых являются различия скоростей потери массы. Согласно рис. 3 максимальная скорость потери массы наблюдается примерно до $t = 50$ с, что может быть связано с испарением свободной влаги из объема образца. После испарения свободной влаги резко (со скоростью около 100 °C/c) увеличивается температура образца, это связано с активной стадией карбонизации. Скорость потери массы (в процентах относительно исходной) на первом этапе (до $t = 50$ с) составляет примерно 1,26 %/с (136 мг/с), а на втором этапе (при $t > 50$ с) скорость резко снижается, примерно до 0,26 %/с (28,5 мг/с). На втором этапе происходят удаление связанной влаги (дегидратация) и реакции деполимеризации, декарбосилирования и альдольной конденсации с образованием угольного остатка [17]. При этом масса образца плавно уменьшается до постоянной массы угольного остатка, когда образец переходит в полностью карбонизированное состояние.

Суммарная погрешность измерений состоит из погрешностей тензодатчика и погрешности системы аналого-цифрового

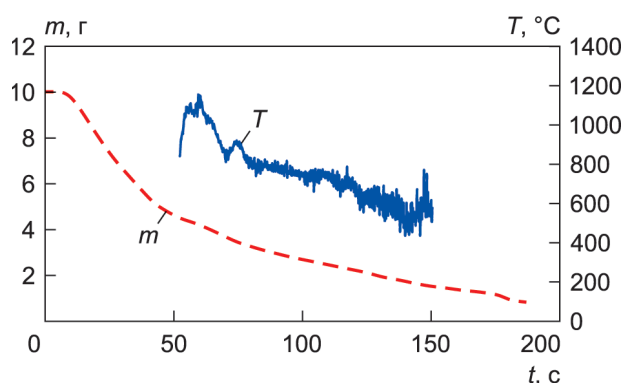


Рис. 3. Изменения массы $m(t)$ и температуры $T(t)$ в процессе микроволновой карбонизации

Fig. 3. Mass loss $m(t)$ and temperature $T(t)$ dependences under microwave carbonization

преобразования сигнала. Комбинированная погрешность тензодатчика составляет не более $\pm 0,02$ % полного диапазона, а погрешность аналого-цифрового преобразования, включающая ошибку квантования, аддитивную и мультипликативную погрешности, а также интегральную и дифференциальную нелинейности составляет 0,5 % полного диапазона. Таким образом, суммарная погрешность методики непрерывного измерения массы образцов в процессе микроволновой термообработки составляет менее 1 %.

Заключение. Применение разработанной и апробированной методики непрерывного измерения массы образцов в процессе микроволновой термообработки диэлектрических материалов позволило получить временные зависимости изменения массы и выявить два характерных этапа карбонизации материала, различающихся скоростью изменения массы. Суммарная погрешность методики непрерывного измерения массы образцов составляет менее 1 %, при этом основной вклад в погрешность вносит ошибка квантования при аналого-цифровом преобразовании. Методика может быть полезна при изучении процессов, происходящих при микроволновой обработке материалов, непосредственно связанных с изменением массы обрабатываемых образцов. Кроме того, разработанная методика непрерывного измерения массы образцов даёт в будущем дополнительные возможности осуществления автоматизированного управления процессами микроволновой обработки материалов.

Список источников

1. Гуськов Ю. А., Медведев А. А., Ратников Е. В. Термогравиметрия при микроволновом нагреве // Приборы и техника эксперимента. 1997. № 2. С. 156–158.
2. Parkes G. M. B., Williams H. M., *Review of scientific instruments*, 2005, vol. 76, no. 6, 065108. <https://doi.org/10.1063/1.1921506>
3. Williams H. M., Parkes G. M. B., *Carbon*, 2008, vol. 46, no. 8, pp. 1169–1172. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.04.011>

4. Song Z., Yang Y., Zhou L. et al., *Waste Management & Research*, 2017, vol. 35, no. 2, pp. 181–189.
<https://doi.org/10.1177/0734242X16662330>

5. Fujii S., Yamamoto M., Haneishi N. et al., *AIP Advances*, 2021, vol. 11, no. 6, 065207. <https://doi.org/10.1063/5.0050907>

6. Kato M., Tsukagoshi K., Aimoto M. et al., *ISIJ International*, 2018, vol. 58, no. 10, pp. 1834–1839.
<https://doi.org/10.2355/ISIJINTERNATIONAL.ISIJINT-2018-192>

7. Лапшинов Б. А., Мамонтов А. В. Методы измерения температуры в технологиях сверхвысокочастотного нагрева // Измерительная техника. 2021. № 6. С. 20–28.
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-6-20-28>

8. Уэндландт У. Термические методы анализа. М.: Мир, 1978. 527 с.

9. Горюнов В. А. Дифференциально-термический и термogravиметрический анализ термодеструкции полимерных материалов // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. Т. 1. С. 154–157.

10. Gomes J., Batra J., Chopda V. R. et al, *Waste Biorefinery*, Elsevier, 2018, pp. 727–749.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63992-9.00025-2>

11. Zhao X., Wang M., Liu H. et al, *Bioresource Technology*, 2012, vol. 104, pp. 673–678.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.137>

12. Xu S., Shen Y., Li Q. et al, *Journal of the American Ceramic Society*, 2021, vol. 104, no. 12, pp. 6345–6363.
<https://doi.org/10.1111/jace.17992>

13. Михайлин Ю. А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 720 с.

14. Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: Учеб. пос. / Под ред. А. А. Берлина. 3-е изд., испр. СПб.: Профессия, 2011. 560 с.

15. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. В 2-х томах. М.: Высшая Школа, 1970. Т. 1. 440 с.

16. Магунов А. Н. Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012. 248 с.

17. Дейнеко И. П. Химические превращения целлюлозы при пиролизе // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2004. № 4. С. 96–112.

References

1. Gus'kov Y. A., Medvedev A. A., Ratnikov E. V., Thermogravimetry in the process of microwave heating, *Instruments and Experimental Techniques*, 1997, no. 40, pp. 292–294. (In Russ.)

2. Parkes G. M. B., Williams H. M., *Review of scientific instruments*, 2005, vol. 76, no. 6, 065108.
<https://doi.org/10.1063/1.1921506>

3. Williams H. M., Parkes G. M. B., *Carbon*, 2008, vol. 46, no. 8, pp. 1169–1172. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.04.011>

4. Song Z., Yang Y., Zhou L. et al., *Waste Management & Research*, 2017, vol. 35, no. 2, pp. 181–189.
<https://doi.org/10.1177/0734242X16662330>

5. Fujii S., Yamamoto M., Haneishi N. et al., *AIP Advances*, 2021, vol. 11, no. 6, 065207. <https://doi.org/10.1063/5.0050907>

6. Kato M., Tsukagoshi K., Aimoto M. et al., *ISIJ International*, 2018, vol. 58, no. 10, pp. 1834–1839.
<https://doi.org/10.2355/ISIJINTERNATIONAL.ISIJINT-2018-192>

7. Lapshinov B. A., Mamontov A. V., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 453–462.
<https://doi.org/10.1007/s11018-021-01954-w>

8. Wendlandt W. W., *Thermal methods of analysis*, Wiley, 1974, 505 p.

9. Gorjunov V. A., Chernikov A. I., Chujkov A. M., Differencial'no-termicheskij i termogravimetricheskij analiz termodestrukcii polimernyh materialov, *Problemy obespechenija bezopasnosti pri likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij*, 2015, no. 1, pp. 154–157. (In Russ.)

10. Gomes J., Batra J., Chopda V. R. et al, *Waste Biorefinery*, Elsevier, 2018, pp. 727–749.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63992-9.00025-2>

11. Zhao X., Wang M., Liu H. et al, *Bioresource Technology*, 2012, vol. 104, pp. 673–678.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.137>

12. Xu S., Shen Y., Li Q. et al, *Journal of the American Ceramic Society*, 2021, vol. 104, no. 12, pp. 6345–6363.
<https://doi.org/10.1111/jace.17992>

13. Mikhaylin Y. A., *Voloknistyye polimernyye kompozitsionnyye materialy v tekhnike* [Fibrous polymer composite materials in engineering], St. Petersburg, Nauchnyye osnovy i tekhnologii Publ., 2013, 720 p. (In Russ.)

14. Kerber M. L., *Polimernyye kompozitsionnyye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya* [Polymer composite materials: structure, properties, technology], St. Petersburg, Professiya Publ., 2011, 560 p. (In Russ.)

15. Lebedev I. V., *Tekhnika i pribory SVCh* [Microwave equipment and devices], in 2 vols, Moscow, Vysshaja Shkola Publ., 1970, vol. 1, 440 p. (In Russ.)

16. Magunov A. N., *Spektral'naja pirometrija* [Spectral pyrometry], Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 248 p. (In Russ.)

17. Dejneko I. P., Himicheskie prevrashcheniya cellyulozy pri pirolize, *Lesnoy zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2004, no. 4, pp. 96–112. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 18.07.2022; одобрена после рецензирования 28.10.2022; принята к публикации 09.11.2022.
The article was submitted 18.07.2022; approved after reviewing 28.10.2022; accepted for publication 09.11.2022.

Измерение показателя преломления с помощью модифицированного метода постоянного отклонения

Александр Игоревич Юрин^{1✉}, Геннадий Николаевич Вишняков², Владимир Леонидович Минаев³

^{1, 3} Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

^{1, 2, 3} Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

² Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

¹ayurin@hse.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6401-5530>

²vish@vniiofi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0237-4738>

³minaev@vniiofi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4356-301X>

Аннотация. Рассмотрены гониометрические методы измерений показателя преломления оптически прозрачных материалов. Предложен модифицированный метод постоянного отклонения для измерения показателя преломления трёхгранных призм. Предложенный модифицированный метод не требует измерения преломляющего угла призмы, что упрощает процесс измерений по сравнению с широко распространёнными методами наименьшего отклонения (метода Фраунгофера) и автоколлимации (метода Литтрова-Аббе). Для реализации предложенного метода применена гониометрическая система, предназначенная для измерения углов, образованных плоскими поверхностями объектов. Для отражения преломлённого луча на его пути расположено неподвижное зеркало, а показатель преломления материала призмы найден в результате решения системы уравнений. Приведены результаты экспериментального исследования трёхгранной призмы из оптического стекла марки К-8 с помощью предложенного метода и их сравнение с показаниями, полученными с помощью метода наименьшего отклонения. Предложенный модифицированный метод постоянного отклонения можно применять для исследования трёхгранных призм из оптически прозрачных материалов, а также жидких оптически прозрачных веществ, помещённых в полую трёхгранную призму.

Ключевые слова: гониометр, показатель преломления, метод постоянного отклонения, рефрактометрия

Для цитирования: Юрин А. И., Вишняков Г. Н., Минаев В. Л. Измерение показателя преломления с помощью модифицированного метода постоянного отклонения // Измерительная техника. 2022. № 12. С. 35–39. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-35-39>

Measurement of the refractive index using a modified constant deviation method

Alexander I. Yurin^{1✉}, Gennady N. Vishnyakov², Vladimir L. Minaev³

^{1, 3} HSE University, Moscow, Russia

^{1, 2, 3} All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹ayurin@hse.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6401-5530>

²vish@vniiofi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0237-4738>

³minaev@vniiofi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4356-301X>

Abstract. Goniometric methods for measuring the refractive index of optically transparent materials are considered. Proposed a modified constant deviation method for measuring the refractive index of a triangular prism. The proposed modification does not require measuring the refractive angle of the prism, which simplifies the measurement process compared to the widely used methods of minimum deviation and autocollimation. To implement the method, a goniometric system was used, designed to measure angles formed by flat surfaces of objects. To obtain the reflection of the refracted beam, a fixed mirror was used, and the refractive index of the prism material was calculated from the solution of a system of equations. The results of an experimental study of a triangular prism made of optical glass using the proposed method and their comparison with results obtained using the method of minimum deviation are presented. This method can be used to study trihedral prisms made of optically transparent materials, as well as liquid optically transparent substances placed in a hollow trihedral prism.

Keywords: goniometer, refractive index, constant deviation method, refractometry

Введение. Показатель преломления вещества – важная характеристика, позволяющая определять концентрацию компонентов в растворах, качество оптических деталей, состав и чистоту материалов и т. д. Точные и достоверные измерения показателя преломления необходимы в оптической промышленности для повышения разрешающей способности объективов и других оптических приборов, в химической промышленности для контроля чистоты и состава веществ, в медицине для контроля качества лекарственных препаратов, в пищевой промышленности при производстве сахара, соков, спиртных напитков, жиров, масел и т. п. [1–6].

Для измерения показателя преломления часто используют гониометрические методы, основанные на измерении углов отклонения света, проходящего через образец¹. Эти методы можно применять как для твёрдых тел, так и для жидкостей и газов. В качестве образцов для исследований, как правило, используют трёхгранные призмы, изготовленные из исследуемого материала либо заполненные исследуемым веществом [7, 8].

Для определения показателя преломления исследуемого вещества (призмы) необходимы точные измерения углов отклонения преломлённых или отражённых призмой лучей. Для точных измерений углов отклонения лучей используют специальные приборы – гониометры. Гониометр имеет неподвижный коллиматор и поворотный предметный стол [9, 10].

Цель данной работы – разработать метод измерения показателя преломления вещества, не требующий измерения преломляющего угла исследуемой призмы. Разработанный метод позволит уменьшить временные затраты и упростить процесс измерений.

Методы измерений. Рассмотрим прохождение света через трёхгранную призму (рис. 1). Обозначим углы падения и преломления на входной грани призмы соответственно φ_1 , ψ_1 , а углы падения и преломления на выходной грани призмы – φ_2 , ψ_2 . Угол между входной и выходной гранями называют преломляющим углом призмы α . Если обозначить угол отклонения луча как ε , то исходя из закона преломления света и геометрических свойств углов можно записать [11]:

$$\left. \begin{aligned} \sin \varphi_1 &= n \sin \psi_1, \\ \sin \varphi_2 &= n \sin \psi_2, \\ \psi_1 + \psi_2 &= \alpha, \\ \varphi_1 + \varphi_2 &= \varepsilon + \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где n – показатель преломления материала призмы.

Решением системы (1) является выражение

$$\varepsilon = \varphi_1 - \alpha + \arcsin\{n \sin[\alpha - \arcsin(\sin \varphi_1 / n)]\}. \quad (2)$$

При увеличении угла падения угол отклонения изменяется и достигает минимума $\varepsilon_{\min}$ при некотором значении φ_1^* (рис. 2). При этом каждому углу $\varepsilon_1 > \varepsilon_{\min}$ соответствуют два значения φ_1 : φ_{11} и φ_{12} .

Из решения системы (1) получим основную формулу расчёта показателя преломления [11]:

$$n = \sqrt{\sin^2 \varphi_1 + \frac{(\sin \varphi_2 + \cos \alpha \sin \varphi_1)^2}{\sin^2 \alpha}}. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что для определения показателя преломления в общем случае необходимо измерить углы φ_1 , φ_2 , α , однако на практике можно ограничиться измерениями любых двух углов из указанных, накладывая на значение третьего некоторое условие. В зависимости от конкретной реализации условия различают различные методы измерений показателя преломления трёхгранных призм – метод автоколлимации Литтрова-Аббе, метод наименьшего отклонения² (МНО) Фраунгофера и метод постоянного отклонения [11].

В частности, в методе автоколлимации добавляются совпадения направлений падающего луча и отражённого назад от выходной грани. В этом случае показатель преломления определяют по формуле

$$n = \sin \varphi_1 / \sin \alpha.$$

Определение минимально возможного угла $\varepsilon_{\min}$ отклонения луча используется в широко распространённом МНО, применение которого позволяет достичь наибольшей точности измерений показателя преломления [12]. В случае использования МНО можно измерить только углы $\varepsilon_{\min}$, α , а уравнение расчёта показателя преломления записать как

$$n = \sin[(\alpha + \varepsilon_{\min})/2] / \sin(\alpha/2). \quad (4)$$

В некоторых случаях применяют метод постоянного отклонения, когда значение ε постоянно. Тогда, кроме преломляющего угла α необходимо измерить угол φ_2 , а показатель преломления рассчитать по формуле (3) с учётом $\varphi_1 = \varepsilon - \varphi_2 + \alpha$. Таким образом, для расчёта показателя преломления рассмотренными методами преломляющий угол призмы должен быть предварительно определён с высокой точностью, что обычно требует двух последовательных измерений углового положения призмы. Поэтому разработка методов, не требующих измерения преломляющего угла призмы, является актуальной задачей.

В статье [13] описан вариант МНО, позволяющий одновременно определять показатель преломления и углы призмы. Однако данная модификация МНО отличается большой трудоёмкостью измерительных процедур, поскольку необходимо определить шесть различных углов наименьшего отклонения.

В [14] предложен способ измерения показателя преломления трёхгранной призмы методом постоянного отклонения с помощью гониометра: на пути проходящего через рабочие грани призмы луча устанавливали зеркало

¹ ГОСТ 28869-90. Материалы оптические. Методы измерений показателя преломления.

² ISO 21395-1:2020. Optics and photonics – Test method for refractive index of optical glasses – Part 1: Minimum deviation method.

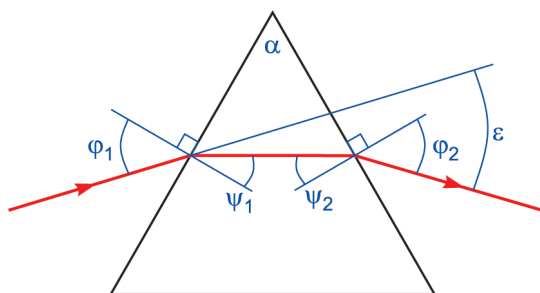


Рис. 1. Преломление луча на гранях призмы

Fig. 1. Refraction of the beam on the faces of the prism

и измеряли преломляющий угол призмы и углы падения, при которых происходит автоколлимация от зеркала. По измеренным значениям углов вычисляли показатель преломления. Данный метод можно модифицировать таким образом, чтобы избавиться от необходимости измерения α .

Модифицированный метод постоянного отклонения. Рассмотрим модификацию метода постоянного отклонения. Суть предложенной авторами модификации метода постоянного отклонения состоит в следующем. Для расчёта показателя преломления необходимо выполнить следующие операции.

Измерить углы падения φ_{11} , φ_{12} , соответствующие углу отклонения ε_1 при достижении автоколлимации от неподвижного зеркала, закреплённого на пути преломлённого луча при изменении углового положения призмы.

Составить систему уравнений согласно (2):

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \varphi_{11} - \alpha + \arcsin\{n \sin[\alpha - \arcsin(\sin \varphi_{11}/n)]\}, \\ \varepsilon_1 = \varphi_{12} - \alpha + \arcsin\{n \sin[\alpha - \arcsin(\sin \varphi_{12}/n)]\}. \end{cases} \quad (5)$$

Найти относительный показатель преломления n материала призмы из решения системы (5).

Таким образом, при применении предложенной модификации необходимо измерить всего два угла φ_{11} , φ_{12} , что уменьшает временные затраты и упрощает процесс измерений.

Так как измерение показателя преломления призмы происходит в воздушной среде, то абсолютный показатель преломления $n_{\text{абс}}$ можно вычислить по формуле [6]:

$$n_{\text{абс}} = n n_{\text{взд}},$$

где $n_{\text{взд}}$ – показатель преломления воздуха.

На рис. 3 изображена схема измерений. Призму 3 необходимо установить на поворотном предметном столе 4 так, чтобы ось вращения стола лежала на биссектрисе преломляющего угла, а входная грань была перпендикулярно падающему лучу 5. На пути преломлённого луча находится неподвижное зеркало 6 под углом ε_1 относительно направления луча автоколлиматора 1, причём $\varepsilon_1 > \varepsilon_{\min}$. При повороте предметного стола необходимо добиться регистрации двух сигналов на фотоприёмнике автоколлиматора,

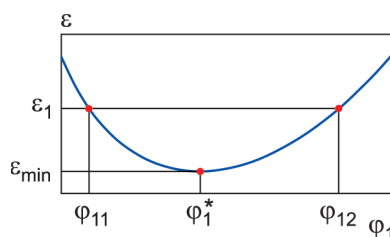
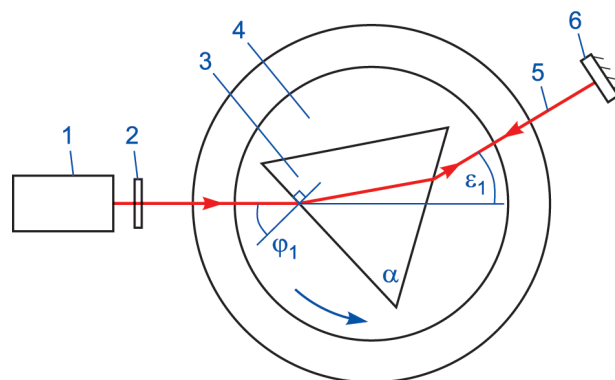
Рис. 2. Зависимость угла отклонения луча ε от угла падения φ_1 на грань призмыFig. 2. Dependence of the angle of deflection of the beam ε from the angle of incidence φ_1 

Рис. 3. Схема измерений угла отклонения луча:

1 – автоколлиматор; 2 – светофильтр; 3 – трёхгранная призма; 4 – вращающийся предметный стол; 5 – луч излучения; 6 – неподвижное зеркало

Fig. 3. Measurement scheme of beam deviation angle:

1 – autocollimator; 2 – filter; 3 – triangular prism; 4 – rotating object table; 5 – radiation beam; 6 – fixed mirror

соответствующих моментам отражения луча от зеркала, и измерить соответствующие углы падения φ_{11} , φ_{12} . Затем из решения системы уравнений (5) можно найти относительный показатель преломления n материала призмы. Так как значение ε_1 заранее известно, то после измерения углов φ_{11} , φ_{12} в системе из двух уравнений (5) остаётся два параметра n , α и существует её однозначное решение.

Экспериментальные результаты. Для реализации предложенного метода в настоящей работе применена гониометрическая система производства ООО «Инертех»³ (Россия), предназначенная для измерения углов между плоскими поверхностями с абсолютной погрешностью не более $\pm 0,25''$ при нормальных условиях эксплуатации. В качестве объекта исследования использована мера показателя преломления в виде трёхгранной призмы, изготовленной из оптического стекла марки К-8⁴.

Исследуемую призму устанавливали на предметном столе так, чтобы входная грань находилась перпендикулярно падающему лучу в поле зрения автоколлиматора, и выставляли начальное положение по изображению автоколлимационной марки. Стол с призмой поворачивали вокруг вертикальной оси с помощью двигателя либо ручки вращения, и определяли углы достижения автоколлимации

³ ООО «Инертех» [сайт]: URL: <http://inertech-ltd.com> (дата обращения: 28.10.2022).

⁴ ГОСТ 13659-78. Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры.

Экспериментальные результаты измерений и расчёта параметров
для трёх граней призмы из стекла марки К-8

Номер грани	φ_{11}	φ_{12}	α	n
1	33°56'25,0"	70°01'03,2"	60°00'48,0"	1,513927
2	33°56'18,4"	70°01'18,7"	60°00'58,6"	1,513870
3	33°57'06,7"	70°00'42,3"	60°01'09,7"	1,513912

после отражения луча от неподвижного зеркала (φ_{11} , φ_{12}), значения которых фиксировались датчиком угла поворота предметного стола. Значения углов вычисляли по разности отсчётов в моменты автоколлимации.

Для получения показаний использовали персональный компьютер с установленным специализированным программным обеспечением GonioScan, предназначенным для управления гониометрической системой, вывода на экран автоколлимационной марки в режиме реального времени, отображения и передачи измерительной информации.

После измерения углов φ_{11} , φ_{12} рассчитали относительный показатель преломления n материала призмы, решив систему уравнений (5) с помощью пакета прикладного математического программного обеспечения. Для уменьшения погрешности провели многократные измерения для разных граней призмы и усреднили полученные результаты.

Таким образом, при использовании предложенной модификации отпадает необходимость измерения преломляющего угла, характерная для традиционных методов призмы. Значение α при необходимости также можно найти из решения системы (5).

Углы измеряли в нормальных условиях⁵ для трёх граней призмы в ручном режиме, каждый угол измеряли пятикратно с усреднением результатов. Для уменьшения погрешности измерений, вызванной размытием автоколлимационной марки из-за дисперсионных свойств стекла, применяли светофильтр Thorlabs FB 630-10 с центральной длиной волны (630±2) нм и полосой пропускания (10±2) нм. Отметим, что применение светофильтра значительно снижает яркость автоколлимационной марки, поэтому для реализации метода желательно использовать лазерные источники излучения с дискретной длиной волны.

В таблице приведены усреднённые результаты, полученные в результате измерения углов достижения автоколлимации φ_{11} , φ_{12} для трёх граней призмы из стекла марки К-8. Значение ε_1 при этом составляло 43°56'38,5". Также в таблице представлены результаты решения системы (5) по данным измерения углов достижения автоколлимации φ_{11} , φ_{12} с помощью функции «Поиск решений» Microsoft Excel (расчёт преломляющих углов α и показателя преломления n).

Среднее значение относительного показателя преломления составило 1,513903. Воспроизводимость результатов измерений можно оценить по среднему квадратическому отклонению, которое не превышает $3 \cdot 10^{-5}$.

Для оценки погрешности измерений сравним полученные результаты со значением показателя преломления призмы, измеренным на рассмотренной гониометрической системе с помощью МНО. Для этого были измерены значения α , $\varepsilon_{\min}$ на каждой грани призмы в тех же условиях.

Абсолютная погрешность измерений Δn , рассчитанная при сравнении со средним значением n^* , полученным с помощью МНО по формуле (4), составила менее $2,0 \cdot 10^{-4}$. Полученный результат доказывает перспективу применения предложенного метода для измерения показателя преломления призм с неизвестными преломляющими углами. Абсолютная погрешность определения преломляющих углов составила не более 1' по сравнению со значениями, полученными после обработки результатов многократных измерений с помощью гониометрической системы. Для дальнейшего уменьшения погрешности можно использовать лазерные источники излучения и автоматизацию процесса измерений углов автоколлимации с усреднением полученных результатов.

Заключение. Предложенная в статье модификация метода постоянного отклонения позволяет упростить процесс измерений и при этом не требует измерения преломляющего угла призмы. Данный метод можно применять для трёхгранных призм из оптически прозрачных материалов, а также для жидких оптически прозрачных веществ, помещённых в полую трёхгранную призму.

Список источников

1. Конопелько Л. А. Рефрактометрические методы в физико-химических измерениях. М.: Триумф, 2020. 208 с.
2. Shehadeh A., Evangelou A., Kechagia D. et al., *Food Chemistry*, 2020, vol. 329, 127085. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127085>
3. Xu M., Shao S., Weng N., Zhou L., Liu Q., Zhao Y., *Applied Science*, 2021, vol. 11(22), 10548. <https://doi.org/10.3390/app112210548>
4. OTI, Wilberforce J. O., Using Refractometer to Determine the Sugar Content in Soft Drinks Commonly Consumed, *IOSR Journal of Applied Chemistry (IOSR-JAC)*, 2016, vol. 9, no. 7, pp. 89–91, available at: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jac/papers/vol9-isue7/Version-1/N0907018991.pdf> (assessed: 15.11.2022).
5. Golunov V. A., Gordeev K. V., Rykov K. N., *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2021, vol. 13(4), pp. 435–442. <https://doi.org/10.17725/rensit.2021.13.435>
6. Kuiper M., Van de Nes A., Nieuwland R., Varga Z., Van der Pol E., *American Journal of Reproductive Immunology*, 2021, vol. 85(2), e13350. <https://doi.org/10.1111/aji.13350>
7. Vishnyakov G. N., Fricke A., Parkhomenko N. M., Hori Y., Pisani M., *Metrologia*, 2016, vol. 53, no. 1A, 02001. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/1A/02001>
8. Вишняков Г. Н., Левин Г. Г., Корнышева С. В. Государственный первичный эталон единицы показателя преломления // Измерительная техника. 2004. № 11. С. 3–6.

⁵ ГОСТ 8.050-73. ГСИ. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений.

9. Pavlov P. A., Filatov Yu. V., Zhuravleva I. B., *Optical Engineering*, 2021, vol. 60(7), 074105.
<https://doi.org/10.1117/1.OE.60.7.074105>

10. Вишняков Г. Н., Левин Г. Г., Корнышева С. В., Зюзев Г. Н., Людомирский М. Б., Павлов П. А., Филатов Ю. В. Измерение показателя преломления на гониометре в динамическом режиме // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 12. С. 53–58. <https://www.elibrary.ru/hsorrv>

11. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии. Л.: Химия, 1974, 350 с.

12. Tilton L. W., *Prism Refractometry and Certain Goniometrical Requirements for Precision*, Forgotten Books, 2017.

13. Kuiper M., Koops R., Nieuwland R., Van der Pol E., *Metrologia*, 2022, vol. 59, no. 5, 055006.
<https://doi.org/10.1088/1681-7575/ac8991>

14. Пат. SU 1578599 A1. Способ измерения показателя преломления оптического стекла / Демчук В. Ю. // Открытия. Изобретения. 1990. № 26.

References

1. Konopel'ko L. A., *Refraktometricheskie metody v fiziko-khimicheskikh izmereniyakh*, Moscow, Triumph Publ., 2020, 224 p. (in Russ.)

2. Shehadeh A., Evangelou A., Kechagia D. et al., *Food Chemistry*, 2020, vol. 329, 127085.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127085>

3. Xu M., Shao S., Weng N., Zhou L., Liu Q., Zhao Y., *Applied Science*, 2021, vol. 11(22), 10548.
<https://doi.org/10.3390/app112210548>

4. OTI, Wilberforce J. O, Using Refractometer to Determine the Sugar Content in Soft Drinks Commonly Consumed,

IOSR Journal of Applied Chemistry (IOSR-JAC), 2016, vol. 9, no. 7, pp. 89–91, available at: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jac/papers/vol9-issue7/Version-1/N0907018991.pdf> (assessed: 15.11.2022).

5. Golunov V. A., Gordeev K. V., Rykov K. N., *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2021, vol. 13(4), pp. 435–442. <https://doi.org/10.17725/rensit.2021.13.435>

6. Kuiper M., Van de Nes A., Nieuwland R., Varga Z., Van der Pol E., *American Journal of Reproductive Immunology*, 2021, vol. 85(2), e13350. <https://doi.org/10.1111/aji.13350>

7. Vishnyakov G. N., Fricke A., Parkhomenko N. M., Hori Y., Pisani M., *Metrologia*, 2016, vol. 53, no. 1A, 02001.
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/1A/02001>

8. Vishnyakov G. N., Levin G. G., Kornysheva S. V., *Measurement Techniques*, 2004, vol. 47, no. 11, pp. 1039–1043.
<https://doi.org/10.1007/s11018-004-0001-0>

9. Pavlov P. A., Filatov Yu. V., Zhuravleva I. B., *Optical Engineering*, 2021, vol. 60(7), 074105.
<https://doi.org/10.1117/1.OE.60.7.074105>

10. Vishnyakov G. N., Levin G. G., Kornysheva S. V., Zyuzev G. N., Lyudomirskii M. B., Pavlov P. A., Filatov Yu. V., *Journal of Optical Technology*, 2005, vol. 72, no. 12, pp. 929–933.
<https://doi.org/10.1364/JOT.72.000929>

11. Ioffe B. V., *Refractometric Methods in Chemistry*, Leningrad, Khimiya Publ., 1974, 350 p. (in Russ.)

12. Tilton L. W., *Prism Refractometry and Certain Goniometrical Requirements for Precision*, Forgotten Books, 2017.

13. Kuiper M., Koops R., Nieuwland R., Van der Pol E., *Metrologia*, 2022, vol. 59, no. 5, 055006.
<https://doi.org/10.1088/1681-7575/ac8991>

14. Demchuk V. Yu., Patent SU 1578599 A1, Byull. Izobret., no. 26 (1990).

Статья поступила в редакцию 05.09.2022; одобрена после рецензирования 20.10.2022; принята к публикации 24.10.2022.
 The article was submitted 05.09.2022; approved after reviewing 20.10.2022; accepted for publication 24.10.2022.

Научная статья

УДК 535.8+621.317.75+621.38+621.391.64+681.2.082+681.785

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-40-45>

Оценка эффективности применения высокоразрешающих анализаторов оптического спектра для характеристики аналоговых оптических трактов с внешней модуляцией

Всеволод Алексеевич Небавский^{1✉}, Ростислав Сергеевич Стариков²

^{1, 2} Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

¹nozaler@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3515-5822>

²rstarikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7369-1565>

Аннотация. Рассмотрена характеристика аналоговых оптических трактов и показано, что особый практический интерес представляют изучение, учёт и снижение нелинейностей, вносимых элементами оптического тракта в выходной сигнал при фотодетектировании. Приведены методы анализа нелинейных искажений аналоговых оптических трактов с внешней модуляцией и предложено применять для их характеристики высокоразрешающие анализаторы оптического спектра. В методах анализа используются результаты измерений оптического спектра, по которым характеризуется непосредственно оптический сигнал тракта без учёта влияния вносимых при фотодетектировании нелинейностей. Представлена аналитическая модель процесса модуляции монохроматического светового излучения двухтоновым радиочастотным сигналом с помощью электрооптического модулятора Маха-Цендера. Рассмотрена взаимосвязь нелинейных спектральных составляющих оптического модулированного и радиочастотного сигналов на выходе фотодетектора. Экспериментально исследованы оптический и радиочастотный спектры сигналов АОТ на специально собранном измерительном стенде. Приведены результаты экспериментов по измерению свободного динамического диапазона аналоговых оптических трактов с применением высокоразрешающих радиочастотного и оптического спектроанализаторов. Обсуждены возможные причины деградации свободного динамического диапазона в процессе фотодетектирования. С использованием аналитической модели нелинейностей модулятора Маха-Цендера экспериментально оценён вклад нелинейности фотодетектирования в искажения выходного сигнала оптического тракта и продемонстрированы различия мощности продуктов интермодуляции для сверхвысокочастотных фотодиодов двух типов.

Ключевые слова: микроволновая фотоника, радиофотоника, аналоговый оптический тракт, модулятор Маха-Цендера, нелинейные искажения, свободный динамический диапазон

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 20-37-90119.

Для цитирования: Небавский В. А., Стариков Р. С. Оценка эффективности применения высокоразрешающих анализаторов оптического спектра для характеристики аналоговых оптических трактов с внешней модуляцией // Измерительная техника. 2022. № 12. С. 40–45. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-40-45>

Testing high-resolution optical spectrum analyzers for characterization analog optical links with external modulation

Vsevolod A. Nebavskiy^{1✉}, Rostislav S. Starikov²

^{1, 2} National Research Nuclear University MPEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

¹nozaler@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3515-5822>

²rstarikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7369-1565>

Abstract. The characterization of analog optical links is considered and it is noted that the study, accounting and reduction of nonlinearities introduced by the elements of the optical link into the output signal during photodetection are of particular practical interest. Methods for analyzing nonlinear distortions of analog optical paths with external modulation are presented and it is proposed to use high-resolution optical spectrum analyzers for their characterization. The analysis methods use the results of measurements of the optical spectrum, which directly characterize the optical signal of the link without taking into account the influence of nonlinearities introduced during photodetection. An analytical model of the process of modulation of monochromatic light radiation by a two-tone radio frequency signal using an electro-optical Mach-Zehnder modulator is presented. The relationship between the nonlinear spectral components of the optical modulated and radio frequency signals at the photodetector output is considered. The optical and radio frequency spectra of AOL signals were experimentally studied on a specially assembled measuring stand. The results of experiments on measuring SFDR of analog optical paths using high-resolution radio frequency and optical spectrum analyzers are presented. Possible reasons for the degradation of the SFDR during photodetection are discussed. Using an analytical model of nonlinearities of the Mach-Zehnder modulator, the contribution of the nonlinearity of photodetection to the distortion of the output signal of the optical link is experimentally estimated and the differences in the power of intermodulation products for microwave photodiodes of two types are demonstrated.

Keywords: Microwave photonics, analog optical link, Mach-Zehnder modulator, nonlinear distortions, spurious free dynamic range

Financial Support: The reported study was funded by Russian Foundation for Basic Research (RFBR), project number 20-37-90119.

Введение. Одна из важнейших проблем построения сверхширокополосных систем микроволновой фотоники – уменьшение нелинейных искажений передаваемых и обрабатываемых сигналов. Базовым элементом любой системы микроволновой фотоники является аналоговый оптический тракт (АОТ); различают АОТ с прямой и с внешней модуляциями светового сигнала [1, 2]. В настоящее время во многих случаях предпочтение отдаётся АОТ с внешней модуляцией. К источникам нелинейных искажений данных АОТ относятся нелинейности передаточных характеристик модуляторов, фотодетекторов и усиливающих элементов. В качестве средств модуляции света в таких оптических трактах наиболее распространены модуляторы Маха-Цендера (ММЦ). Серийные коммерческие образцы ММЦ обеспечивают широкие (до 100 ГГц) полосы рабочих частот, а также обладают приемлемыми электрическими и оптическими характеристиками. На практике часто именно нелинейность передаточной характеристики ММЦ вносит наибольший вклад в суммарные нелинейные искажения выходного сигнала АОТ. Уменьшить нелинейные искажения ММЦ можно путём точного контроля рабочей точки модулятора и применения методов линеаризации сигналов АОТ, методам линеаризации посвящено значительное количество работ [2–18].

При характеристике нелинейных искажений АОТ используют стандартный тест с двумя гармоническими сигналами с малой отстройкой частоты [19]. При этом анализируется радиочастотный спектр электрического сигнала АОТ на выходе, что препятствует непосредственному анализу работы модулятора и других оптических компонентов тракта. Появление новейших анализаторов оптического спектра с разрешением в десятки мегагерц предоставляет новые возможности характеристики АОТ и, в частности, обеспечивает получение оценок нелинейных искажений непосредственно светового сигнала, исключая вносимые при фотодетектировании нелинейности.

Цель настоящей статьи – оценка эффективности применения высокоразрешающих анализаторов оптического спектра для характеристики нелинейных искажений сигналов АОТ с внешней модуляцией. Характеризация основана на результатах измерений и анализа радиочастотного и оптического спектров сигналов АОТ.

Нелинейные искажения АОТ с внешней модуляцией.

Схема АОТ с внешней модуляцией представлена на рис. 1. В качестве источника светового излучения в зависимости от назначения тракта можно использовать узко- и широкополосные лазеры. Например, лазеры, работающие в режиме синхронизации мод, применяются при построении трактов с оптической выборкой. В настоящей работе рассмотрен монохроматический случай, но при необходимости его можно обобщить и на случаи широкополосного оптического излучения с учётом хроматизма элементов АОТ.

Рассмотрим основные метрики THD , $SFDR$, описывающие нелинейные искажения АОТ. Первая метрика представляет собой отношение суммарной мощности нелинейных

составляющих к основной гармонике сигнала (total harmonic distortions)

$$THD = -10 \lg \frac{P_{nl}}{P_l} = -10 \lg \frac{P_2 + P_3 + P_4 + \dots}{P_l}, \quad (1)$$

где P_{nl} – мощности кратных гармонических составляющих, порождённых основной гармоникой мощностью P_l .

Также к такой метрике может быть добавлена мощность шума P_N :

$$THD + N = -10 \lg \frac{P_{nl} + P_N}{P_l}. \quad (2)$$

Вторая метрика – свободный динамический диапазон (spurious free dynamic range)

$$SFDR_n [\text{дБ}] = \frac{n-1}{n} \left\{ OIP_n [\text{дБ}] - P_N \left[\frac{\text{дБ}}{\text{Гц}} \right] - 10 \lg B [\text{Гц}] \right\}, \quad (3)$$

где $OIP_n [\text{дБ}]$ (output interception point) – значения мощности на пересечении экстраполированных малых сигнальных откликов по основной частоте и по искажениям n -го порядка; B – полоса рабочих частот системы.

Параметр $SFDR$ можно определить как диапазон мощностей входного сигнала, при котором искажения системы находятся на уровне шумов.

Описав процессы, происходящие в типовом АОТ (см. рис. 1), можно понять какие факторы влияют на образование нелинейных искажений. Поле на выходе модулятора в случае входного монохроматического излучения описывается выражением

$$E_{\text{вых}} = E_0 \left\{ a \sin(\omega_0 t) + b \sin \left(\omega_0 t + \pi \frac{V_{\text{см}} + V_{\text{п}}}{V_{\pi}} \right) \right\}, \quad (4)$$

где a , b имеют смысл коэффициентов затухания в плечах модулятора, причём $a^2 + b^2 \leq 1$; E_0 , ω_0 – амплитуда и несущая частота входного излучения; $V_{\text{см}}$ – постоянное напряжение смещения; $V_{\text{п}}$ – переменное напряжение модулирующего сигнала; V_{π} – полуволновое напряжение модулятора.

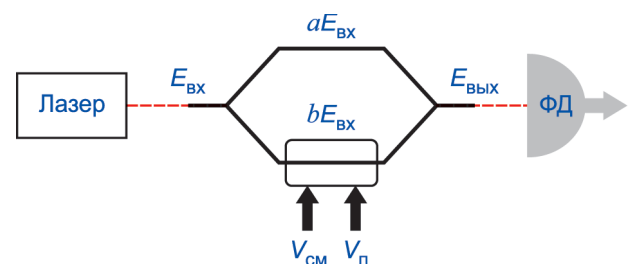


Рис. 1. Схема аналогового оптического тракта с модулятором Маха-Цендера (ФД – фотодиод)

Fig. 1. Schematic diagram of an analogue optical link with Mach-Zender modulator (PD – photodiode)

Постоянный набег фазы $\phi_0 = \pi V_{\text{см}}/V_{\pi}$ принято подбирать исходя из режима работы модулятора. Переменная составляющая в случае подачи двухтонового с частотами ω_1, ω_2 сигнала выражается как

$$\phi = m_1 \sin(\omega_1 t) + m_2 \sin(\omega_2 t), \quad (5)$$

где m_1, m_2 – глубины модуляции.

С учётом (5) выражение (4) для выходного поля можно разложить на спектральные составляющие:

$$E(t) = E_0 \left\{ a \sin(\omega_0 t) + b \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_n(m_1) J_k(m_2) \sin(\omega_0 t + (n\omega_1 + k\omega_2)t + \phi_0) \right\}, \quad (6)$$

где J_n, J_k – функции Бесселя первого рода n -го и k -го порядков.

Мощности несущей выходного поля P_{ω_0} и боковых гармоник $P_{\omega_0 + n\omega_1 + k\omega_2}$ соответственно описываются выражениями

$$P_{\omega_0} = E_0^2 \left\{ \frac{a^2}{2} + \frac{b^2 J_0^2(m_1) J_0^2(m_2)}{2} + ab J_0(m_1) J_0(m_2) \cos \phi_0 \right\}; \quad (7)$$

$$P_{\omega_0 + n\omega_1 + k\omega_2} = E_0^2 b^2 0,5 J_n^2(m_1) J_k^2(m_2); \quad n, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (8)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка.

Обозначим $\mathfrak{I}_{nk} = J_n^2(m_1) J_k^2(m_2)$ в выражениях (7), (8), которые зависят от свойств модулирующих сигналов. На рис. 2 приведён оптический спектр модулированного оптического излучения. Согласно выражениям (7), (8) и рис. 2 напряжение постоянного смещения, задающего рабочую точку модулятора, определяет разность фаз между несущей в его плечах, а, следовательно, мощность несущей, но не мощность боковых модуляционных составляющих на его выходе. Действительно, в силу закона сохранения энергии мощность, которая «уходит» в модулированную составляющую, отнимается из несущей.

Рассмотрим детектирование модулированного излучения фотодиодом, для простоты предположив, что он

работает в линейном режиме. Фототок можно описать выражением

$$i(t) = RT^{-1} \int_t^{t+T} E^2(\tau) d\tau, \quad (9)$$

где R – приведённая чувствительность; $T^{-1} = \Delta f$ – ширина рабочей полосы фотодиода.

На фотодиоде по сути наблюдается интерференция напряжённости полей двух плечей модулятора:

$$i = i_1 + i_{12} + i_2. \quad (10)$$

Фототок i_2 , обусловленный модулированной составляющей поля, запишем в виде

$$\begin{aligned} i_2 &= E_0^2 b^2 RT^{-1} \times \\ &\times \int_t^{t+T} \sin^2((\omega_0 \tau + m_1 \sin(\omega_1 \tau) + m_2 \sin(\omega_2 \tau) + \phi_0)) d\tau = \\ &= E_0^2 b^2 R 0,5 T^{-1} \times \\ &\times \int_t^{t+T} 1 - \cos^2((\omega_0 \tau + m_1 \sin(\omega_1 \tau) + m_2 \sin(\omega_2 \tau) + \phi_0)) d\tau = \\ &= E_0^2 b^2 R 0,5 T^{-1}. \end{aligned} \quad (11)$$

Из выражений (10), (11) следует, что модуляция содержится только в интерференционном члене:

$$\begin{aligned} i_{12} &= 2RT^{-1} \int_t^{t+T} E_1 E_2(\tau) d\tau = abRE_0^2 \times \\ &\times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} T^{-1} \int_t^{t+T} J_n(m_1) J_k(m_2) \cos((\omega_1 n + \omega_2 k)t + \phi_0) d\tau = \\ &= abRE_0^2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{\sin[0,5T(n\omega_1 + k\omega_2)]}{0,5T(n\omega_1 + k\omega_2)} J_n(m_1) J_k(m_2) \times \\ &\times \cos((\omega_1 n + \omega_2 k)t + \phi_0 + \phi_{nk}). \end{aligned} \quad (12)$$

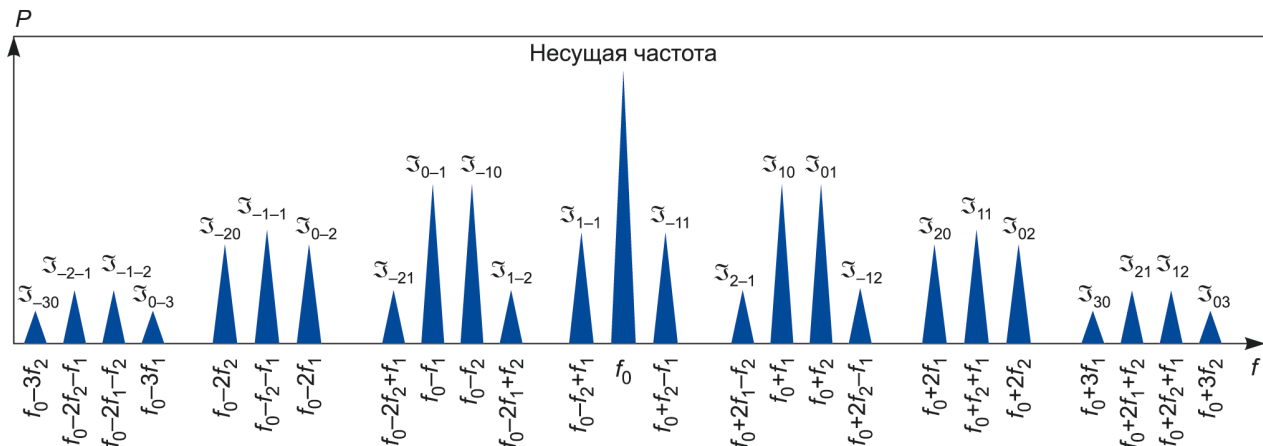


Рис. 2. Оптический спектр модулированного сигнала

Fig. 2. Optical spectrum of the modulated signal

Величина $H_{nk} = \frac{\sin[0,5T(n\omega_1 + k\omega_2)]}{0,5T(n\omega_1 + k\omega_2)}$ обусловлена формой функции спектральной чувствительности фотодетектора, а $\phi_{nk} = 0,5T(n\omega_1 + k\omega_2)$ – фазовой задержкой этой функции. Общее выражение для фототока, определяемого интерференционным членом выражения для i_{12} , разбивается на нечётные $i_{нч}$ и чётные $i_{ч}$ гармонические составляющие и постоянную i_{00} :

$$i_{12} = i_{00} + i_{ч} + i_{нч}; \quad (13)$$

$$i_{00} = \cos\phi_0 abRE_0^2 J_0(m_1) J_0(m_2); \quad (14)$$

$$i_{ч} = 2\cos\phi_0 abRE_0^2 \times \sum_{n+k(\text{чётное})}^{+\infty} H_{nk} J_n(m_1) J_k(m_2) \cos((\omega_1 n + \omega_2 k)t + \phi_{nk}); \quad (15)$$

$$i_{нч} = 2\sin\phi_0 abRE_0^2 \times \sum_{n+k(\text{нечётное})}^{+\infty} H_{nk} J_n(m_1) J_k(m_2) \sin((\omega_1 n + \omega_2 k)t + \phi_{nk}). \quad (16)$$

Нечётные или чётные гармонические составляющие подавляются в случае $\phi_0 = \pi n$, $n=0,1,2, \dots$, или $\phi_0 = \pi/2 + \pi n$, $n=0,1,2, \dots$. Мощности гармонических составляющих $P_{n\omega_1 + k\omega_2}$ фотодетектированного сигнала i в соответствии с выражениями (10)–(16) (рис. 3) определяются как

$$P_{n\omega_1 + k\omega_2} = \begin{cases} 2a^2 b^2 E_0^4 R^2 \cos^2 \phi_0 H_{nk}^2 \mathfrak{T}_{nk}, & n+k - \text{чётное}; \\ 2a^2 b^2 E_0^4 R^2 \sin^2 \phi_0 H_{nk}^2 \mathfrak{T}_{nk}, & n+k - \text{нечётное}; \\ E_0^4 R^2 \left(\frac{a^2 + b^2}{2} + ab J_0(m_1) J_0(m_2) \cos \phi_0 \right)^2, & n, k = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Тогда коэффициент нелинейных искажений (без учёта нелинейностей фотодетектора) исходя из выражения (17) примет вид

$$THD = 10 \lg \left\{ \left(\cos^2 \phi_0 \sum_{n\omega_1 + k\omega_2(\text{чётное})} H_{nk}^2 \mathfrak{T}_{nk} + \sin^2 \phi_0 \sum_{n\omega_1 + k\omega_2(\text{нечётное})} H_{nk}^2 \mathfrak{T}_{nk} \right) \times \left[\sin^2 \phi_0 (H_{01}^2 \mathfrak{T}_{01} + H_{01}^2 \mathfrak{T}_{10}) \right]^{-1} \right\}.$$

Таким образом, вклад нелинейных составляющих радиочастотного спектра в выражении (17) определяются мощностями нелинейных спектральных составляющих оптического спектра (7), (8) и напряжением постоянного смещения.

Экспериментальное исследование оптического и радиочастотного спектров сигналов АОТ. Для экспериментов собран измерительный стенд, представленный на рис. 4. Источник оптического излучения – узкополосный перестраиваемый лазер TWL-C-HP-B-M (Optilab, США) с полосой

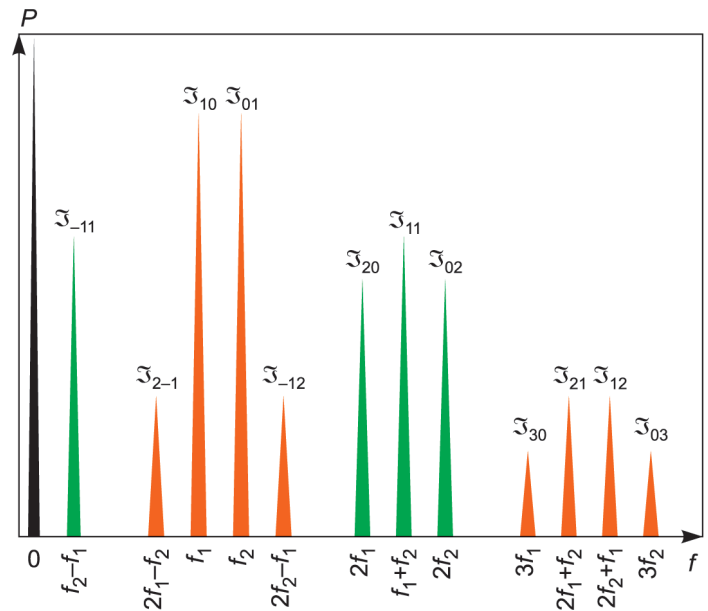


Рис. 3. Спектр двухтонового сигнала: рабочая точка модулятора в максимуме или минимуме (зелёный спектр); рабочая точка модулятора в квадратуре (оранжевый спектр)

Fig. 3. Spectrum of a two-tone signal: the operating point of the modulator is at maximum or minimum (Green); Modulator operating point in quadrature (Orange)

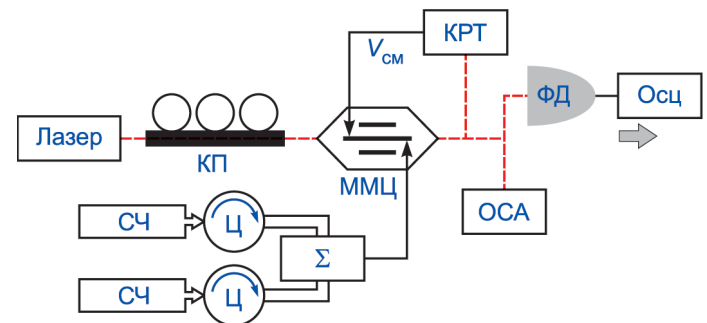


Рис. 4. Схемы измерения оптического и электрического спектров модулированного сигнала:

КП, КРТ – контроллеры поляризации и рабочей точки соответственно; Ц – циркулятор; Σ – сумматор сверхвысокочастотных сигналов; СЧ – синтезатор частот; ФД – фотодиод; Осц – осциллограф; ОСА – оптический спектроанализатор; ММЦ – модулятор Маха-Цендера

Fig. 4. Schemes for measuring the optical and electrical spectra of the modulated signal:

PC – polarization controller; BC – bias point controller; C – circulator; Σ – microwave signal adder; FS – frequency synthesizer; PD – photodiode; Osc – oscilloscope; OSA – optical spectrum analyzer; MZM – Mach-Zehnder modulator

перестройки 1527–1567 нм, максимальной мощностью около 10 дБм и шириной спектра оптического излучения менее 10 кГц. Тестовые радиосигналы формировались с помощью сложения в сумматоре сверхвысокочастотных сигналов двух источников – синтезаторов UNO-11M-RF (ООО «Авантех», Россия), работающих в диапазоне 0,1–13 ГГц. Для подавления зеркальных составляющих сигналов примене-

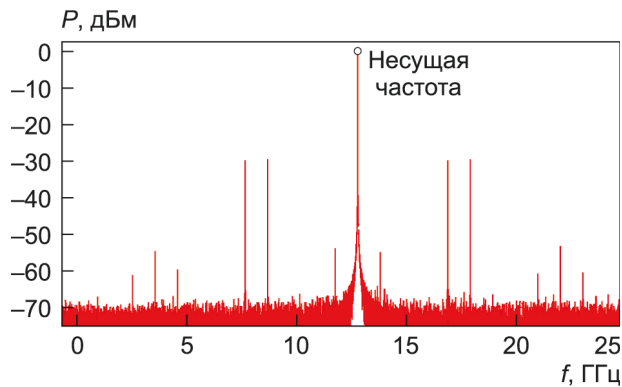


Рис. 5. Оптический спектр двухтонового сигнала (частоты 5; 6 ГГц), измеренный на выходе модулятора Маха-Цендера; несущая частота лазера на длине волны 1550 нм

Fig. 5. Optical spectrum of a two-tone signal at 5 and 6 GHz, measured at the output of a Mach-Zehnder modulator. Laser carrier at a wavelength of 1550 nm

ны циркуляторы. Тестовый двухтоновый сигнал подавался в модулятор LMB-20 (Optilab, США), обеспечивающий рабочую полосу частот 0,01–20 ГГц. На входе модулятора поляризация излучения лазера управлялась контролером поляризации. Для анализа модулированного оптического излучения использован бриллюэновский анализатор спектра высокого разрешения BOSA 400 (Aragon Photonics, Испания) с полосой анализа 1525–1565 нм, разрешением 10 МГц и динамическим диапазоном измерений 80 дБ. Оптический сигнал тракта регистрировался либо фотодиодом ДФДМШ40-012 (НПФ «Дилаз», Россия) с полосой пропускания 0,01–12 ГГц и диапазоном спектральной чувствительности 980–1650 нм, либо высоколинейным фотодиодом Optilab PD-50-M (Optilab, США) с полосой пропускания 0–50 ГГц и диапазоном спектральной чувствительности 1200–1650 нм. Спектр радиочастотного сигнала фотодетектора анализировался путём стандартного быстрого преобразования Фурье с помощью осциллографа DSAZ334A (Keysight, США) с истинной аналоговой полосой пропускания 33 ГГц. В силу низкой энергетики боковых составляющих модулированного сигнала анализ нелинейных составляющих оптического спектра был несколько ограничен по точности (рис. 5). Перекрёстные составляющие на частотах 3-го порядка скрыты за шумами, однако доступны перекрёстные составляющие 2-го порядка. Значения мощности для перекрёстных составляющих 3-го порядка в случае равенства мощностей фундаментальных составляющих можно вычислить по формуле (8). Для случая, представленного на рис. 6, разница основных составляющих и нелинейных искажений 3-го порядка (т. е. свободный динамический диапазон $SFDR$) составила 55 дБ. После фотодетектирования это значение уменьшилось до 51 и 44 дБ при использовании фотодиодов PD-50-M (Optilab, США) и ДФДМШ40-012 (НПФ «Дилаз», Россия) соответственно. Такое уменьшение измеренного значения $SFDR$ может быть обусловлено тремя причинами: неточностью при контроле рабочей точки ММЦ; собственными нелинейностями фотодиода; нелинейностями измерительного устройства.

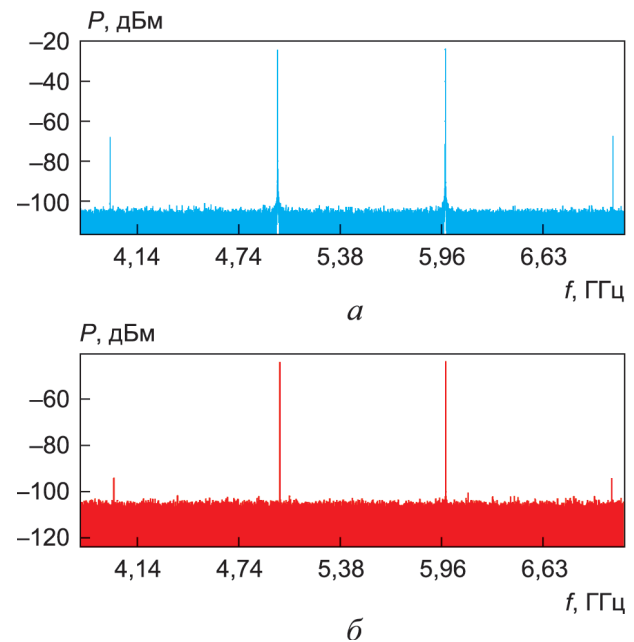


Рис 6. Электрический спектр двухтонового сигнала (частоты 5; 6 ГГц) в окрестности перекрёстных нелинейных искажений 3-го порядка, измеренный на выходах фотодиодов ДФДМШ40-012 (а) и Optilab PD-50-M (б)

Fig. 6. The electrical spectrum of a two-tone signal at frequencies of 5 and 6 GHz, measured in the area of third order intermodulation products, measured at the output of a DFDMSH40-012 photodiode (a) and an Optilab PD-50-M photodiode (b)

Если нелинейность оценивается по искажениям 3-го порядка, то первую причину можно исключить. Кроме того, в случае высокой мощности электрического сигнала на выходе фотодиода (как в представленном эксперименте с фотодетектором ДФДМШ40-012) для устранения влияния нелинейности измерительного устройства необходимо использовать существующие широко распространённые сверхвысокочастотные спектроанализаторы высокого класса. Кроме того, для АОТ с «длинными линиями» подобные измерения можно проводить отдельно после модуляции, отдельно после прохождения оптоволокна, отдельно после фотодетектирования и усиления. Заметим также, что подобный анализ для АОТ с прямой модуляцией также возможен на основе моделей генерационных характеристик модулируемых лазерных источников. Таким образом, имеется возможность независимого анализа деградации свободного динамического диапазона, происходящей на отдельных элементах АОТ.

Заключение. Характеризация нелинейностей сигналов аналоговых оптических трактов с внешней модуляцией непосредственно на разных компонентах тракта может быть обеспечена эффективным применением высокоразрешающих оптического и радиочастотного спектроанализаторов. С использованием аналитической модели нелинейностей модулятора Маха-Цендера получены экспериментальные оценки вклада фотодетектирования в нелинейность выходного сигнала тракта, продемонстрированы различия

мощности интермодуляционных искажений 3-го порядка для высоколинейного и обычного сверхвысокочастотного фотодиодов. Следует отметить некоторое ограничение рассмотренных методов анализа нелинейных искажений аналоговых оптических трактов с внешней модуляцией, связанное с относительно низкими значениями динамического диапазона измерений современных высокоразрешающих оптических спектроанализаторов (в настоящее время типично до 80 дБ) по сравнению с доступным динамическим диапазоном радиочастотных спектроанализаторов (более 120 дБ). Несмотря на это, по мнению авторов настоящей статьи, опробованные в данной работе методы характеристики аналоговых оптических трактов и реализующие эти методы высокоразрешающие спектроанализаторы можно успешно применять при решении широкого ряда задач микроволновой фотоники.

Список источников / References

1. Cox C. H., *Analog Optical Links*, Cambridge, Cambridge University Press, 2009, 288 p.
2. Urlick V. J., McKinney J. D., Williams K. J., *Fundamentals of microwave photonics*, NY, Wiley, 2015, 496 p.
3. Urlick V. J. et al., Analog fiber-optic links employing cascaded phase modulation stages, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2012, vol. 54, pp. 2797–2801.
4. Dai Y. et al., *Opt. Express*, 2017, vol. 25, no. 17, pp. 20770–20779. <https://doi.org/10.1364/OE.25.020770>
5. Zhu G., Liu W., Fetterman H. R., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2009, vol. 21, no. 21, pp. 1627–1629. <https://doi.org/10.1109/LPT.2009.2031166>
6. Li S. et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2010, vol. 22, no. 24, pp. 1775–1777. <https://doi.org/10.1109/LPT.2010.2082516>
7. Li J. et al., *Opt. Lett.*, 2013, vol. 38, no. 21, pp. 4285–4287. <https://doi.org/10.1364/OL.38.004285>
8. Chan E. H. W., *Appl. Opt.*, 2014, vol. 53, no. 7, pp. 1306–1314. <https://doi.org/10.1364/AO.53.001306>
9. Liang D. et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2015, vol. 27, no. 15, pp. 1639–1641. <https://doi.org/10.1109/LPT.2015.2433015>
10. Singh S., Arya S. K., Singla S., *Wireless Pers. Commun.*, 2020, vol. 114, no. 1, pp. 85–92. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07351-w>
11. Shaqiri S., Haxha S., Mirza T. N., *Opt. Express*, 2020, vol. 28, no. 12, 17521. <https://doi.org/10.1364/OE.394461>
12. Shaqiri S., Haxha S., *Elsevier Optik*, 2020, vol. 204, 164103. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.164103>
13. Mirza T. N., Haxha S., Dayoub I., *IEEE Systems Journal*, 2021, vol. 15, no. 4. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3051394>
14. Prescod A., Dingel B.B., Madamopoulos N., *Proceedings SPIE OPTO: Integrated Optoelectronic Devices*, 2009, San Jose, USA, 2009, vol. 7234, Broadband Access Communication Technologies III, 72340E. <https://doi.org/10.1117/12.808230>
15. Dingel B., Madamopoulos N., Prescod A., *Opt. Commun. Technol. InTech 2017*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69262>
16. Dingel B. et al., *Optics Communications*, 2011, vol. 284, no. 24, pp. 5578–5587. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.08.030>
17. Небавский В. А., Стариков Р. С., Черёмхин П. А. Методы линеаризации аналоговых оптических трактов // Успехи современной радиоэлектроники. 2021. Т. 75. № 12. С. 42–62. [Nebavskiy V. A., Starikov R. S., Cheremkhin P. A., Linearization methods for analog optical paths, *Journal Achievements of Modern Radioelectronics*, 2021, no. 12, pp. 42–62. (In Russ.)]
18. Prescod A. et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2010, vol. 22, no. 17, pp. 1297–1299. <https://doi.org/10.1109/LPT.2010.2053842>
19. Kundert K., *Accurate and Rapid Measurement of IP 2 and IP 3*, The Designer's Guide Community, 2002, 13 p.

Статья поступила в редакцию 04.10.2022; одобрена после рецензирования 05.10.2022; принята к публикации 07.10.2022.
The article was submitted 04.10.2022; approved after reviewing 05.10.2022; accepted for publication 07.10.2022.

Измерительно-управляющая система термокомпрессионного оборудования с регламентированными температурно-скоростными параметрами деформирования

Максим Владимирович Жаров

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия, MaximZharov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2962-0452>

Аннотация. Рассмотрены проблемы, возникающие при использовании автоматизированной системы управления работой термокомпрессионного деформационного оборудования. Автоматизированная система предназначена для контроля течения металла при формировании геометрически сложных изделий в условиях изотермической штамповки и штамповки в состоянии сверхпластичности. К выявленным проблемам относятся несоблюдение температурно-скоростных параметров деформирования, инерционность системы, сложность переналадки системы при изготовлении деталей из разных материалов или переходе на другое оборудование. Для преодоления инерционности системы предложено использовать цифровые экстраполяционные алгоритмы, основанные на экспериментальных значениях фактических характеристик хода рабочих органов установки при воздействии тока в зависимости от его силы и длительности воздействия, и применять широтно-импульсную модуляцию для управления подачей тока на нагревательные элементы. Внесены изменения в аппаратную часть автоматического блока управления установки и в прикладную управляющую программу TermoControl 3.1 Alpha. Разработана версия программы TermoControl 3.7 Alpha, которая обеспечивает высокую точность соблюдения температурно-скоростных параметров штамповки: отклонение от заданных параметров нагрева (погрешность) не более 2–4 °С; погрешность скорости деформирования не более $0,1 \cdot 10^{-3}$ мм/с. Создана обширная база данных режимов нагрева, выдержки и охлаждения, основанная на результатах прогнозирования хода для термокомпрессионного оборудования различных типов и моделей. Применение усовершенствованной автоматизированной системы управления позволило достичь отклонений от заданных режимов нагрева и деформирования, не выходящих за пределы статистической погрешности.

Ключевые слова: термическое линейное расширение, управляющий сигнал, автоматизированная система, термокомпрессионная обработка, термоупругий пресс, скорость деформирования, температурно-скоростные параметры, дефекты формы, утяжина, складка, температура нагрева, качество

Для цитирования: Жаров М. В. Измерительно-управляющая система термокомпрессионного оборудования с регламентированными температурно-скоростными параметрами деформирования // Измерительная техника. 2022. № 12. С. 46–51. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-46-51>

Measuring and control system of thermocompression equipment with regulated temperature and speed parameters of deformation

Maxim V. Zharov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, MaximZharov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2962-0452>

Abstract. The problems that arise when using an automated control system for the operation of thermocompression deformation equipment are considered. The automated system under consideration is designed to control the nature of the metal flow during the formation of geometrically complex products under conditions of isothermal forging and forging in a state of superplasticity. The identified problems include non-compliance with the temperature and speed parameters of deformation, the inertia of the system, the complexity of reconfiguring the system in the manufacture of parts from different materials, when switching to the use of other equipment. To overcome the inertia of the system, it is proposed to use digital extrapolation algorithms based on the experimental recording of the actual characteristics of the stroke of the operating elements of the installation when exposed to current, depending on its strength and duration of exposure, and the use of modulo-width modulation to control the current supply to the heating elements. Changes have been made to the hardware of the automatic control unit and to the TermoControl 3.1 Alpha application program. As a result of the research, a new improved version of the TermoControl 3.7 Alpha program was created, which ensures high accuracy in observing the temperature and speed parameters of stamping: deviation from the specified heating parameters (error) is up to 2–4 °C; deformation rate error – up to $0.1 \cdot 10^{-3}$ mm/s. As a result of the work carried out, an extensive database of heating, holding, and cooling modes was created, based on the results of predicting the course for thermocompression equipment of various types and models. The results obtained made it possible to achieve that deviations from the specified modes of heating and deformation when using an improved automated control system fit within the framework of the usual statistical error.

Keywords: thermal linear expansion, control signal, automated system, thermocompression processing, thermocompression press, deformation rate, temperature-speed parameters, shape defects, sink, crease, heating temperature, system inertia

Введение. В настоящее время в связи с высокой стоимостью авиационных материалов большое внимание уделяется мало- и безотходным методам штамповки авиационных деталей. В частности, при штамповке авиационных панелей и обечаек перед технологами на производстве ставится задача разработать технологию, при которой минимизируется последующая механическая обработка этих деталей. В связи с тем, что формирование сложных оребренных панелей и обечаек, в которых ширина ребра больше ширины полотна панели или высота ребра превышает ширину полотна в несколько раз, возможно образование дефектов в виде утяжин, зажимов и попадания окисных пленок с поверхности металла в тело изделия. Данные дефекты недопустимы для ответственных деталей, от которых зависит надёжность всей конструкции планера самолёта, корпуса баллистической ракеты или объекта космической техники [1, 2].

Образование утяжины происходит, если материал заготовки теряет устойчивость и отрывается от поверхности обрабатывающего штамповочного инструмента. Это происходит при высокой скорости деформирования и высокой пластичности материала [3]. Кроме того, высокая скорость деформирования не позволяет дополнительной тепловой энергии от температурного эффекта деформации распределиться в значительном объёме получаемого изделия и локализуется в зоне высокой интенсивности деформаций, дополнительно разогревая данную зону. В итоге увеличивается пластичность материала и теряется его устойчивость при деформировании [4, 5]. В частности, при изготовлении авиационных панелей довольно часто такой дефект возникает при деформировании сплава 01420 при отклонении от оптимальных температурно-скоростных параметров деформирования. Формирование зажима на боковой поверхности определяется особенностями течения металла при использовании различных температурно-скоростных режимов деформирования. При потере устойчивости ребра в ходе его формирования происходит его изгиб и смятие [6]. При этом образуется складка металла.

Даже если произойдет «схлопывание» утяжины или зажима на поверхности панели в условиях последующей пластической деформации, внутрь металла изделия будут затянуты с его поверхности окисные пленки, которые будут препятствовать твёрдофазному соединению металла. Такой дефект, играющий роль концентратора напряжений, недопустим в силовых элементах летательного аппарата. Чтобы предотвратить образование подобных дефектов, рассматриваются разные варианты деформирования металлов и сплавов при оптимальных температурно-скоростных режимах с использованием заготовок минимальной толщины для экономии дорогостоящих материалов [7].

Одним из направлений реализации технологии мало- и безотходной штамповки авиационных панелей и обечаек

является применение термокомпрессионного оборудования. Данное оборудование позволяет создать силовое воздействие на заготовку за счёт нагрева и расширения силовых элементов, которые через установленную внутрь штамповую оснастку и оправку деформируют заготовку [8, 9]. Наиболее важное достоинство использования термокомпрессионных установок – возможность минимизации скорости движения деформирующего инструмента, что позволяет деформировать материалы без потери их устойчивости, в том числе в состоянии сверхпластичности. Отклонение от оптимальных температурно-скоростных параметров может привести к потере устойчивости полотна или ребра и, соответственно, к образованию дефектов (указанных выше утяжин, зажимов, окисных плен внутри тела изделия). Наиболее существенными недостатками штамповки на термокомпрессионном технологическом оборудовании является незначительное значение рабочего хода, определяемое геометрическими параметрами конструкции установки, и сложность управления скоростью рабочего хода [10, 11].

Целью работы является усовершенствование автоматизированной системы управления работой термоупругого деформационного оборудования с целью повышения точности соблюдения температурно-скоростных режимов деформирования материалов при изготовлении деталей ответственного назначения.

Устройство и принцип работы автоматизированной системы управления работой термоупругого деформационного оборудования. Автоматизированная система включает основные элементы (рис. 1):

термокомпрессионное технологическое оборудование (термокомпрессионную установку ТКУ) вместе с установленной штамповой оснасткой и подключённым термоизмерительным устройством;

блок автоматического управления БАУ скоростью нагрева термокомпрессионной установки;

персональный компьютер (ПК) с вмонтированной платой цифроаналогового и аналого-цифрового преобразователей (ЦАП-АЦП) типа L-1250.

Система функционирует следующим образом. Подаваемый через трансформатор электрический ток нагревает трубчатые электронагреватели (ТЭН) термокомпрессионного оборудования, которые в свою очередь нагревают клиновидные и опорные элементы термокомпрессионной установки. Материал для изготовления клиновидных элементов – сплав марки 70ГНДХ – характеризуется высоким по сравнению с другими сплавами и сталями термическим расширением. Температурный коэффициент линейного расширения сплава марки 70ГНДХ составляет $32 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, что более чем в два раза выше аналогичного коэффициента штамповых сталей, применяемых для изготовления оснастки (для стали марки 5ХНМ этот коэффициент составляет $14,7 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) [12, 13].

Подвижные рабочие клиновидные элементы рабочего блока термокомпрессионного устройства, нагреваясь и расширяясь, перемещаются по опорным клиновидным блокам, создают компрессионное усилие в центральной части термоупругого оборудования и тем самым деформируют материал, находящийся в этой части. Опорные клиновидные элементы также нагреваются и расширяются, изменяя ход подвижных частей оборудования.

Управляя температурой нагрева системой клиновидных элементов термокомпрессионной установки, можно изменять ход штамповочного инструмента, контролировать скорость его перемещения и, следовательно, управлять температурно-скоростными параметрами деформирования. Автоматизированная система управления позволяет управлять температурно-скоростными режимами деформирования с высокой точностью [14, 15].

Термопарой, находящейся в рабочих элементах термокомпрессионного оборудования, вырабатывается определённая термоэлектродвижущая сила (термоЭДС), пропорциональная температуре нагрева блоков системы. Блок автоматизированного управления преобразует полученный сигнал термоЭДС и подаёт его на плату ЦАП-АЦП, где аналоговый сигнал напряжения модифицируется в цифровой 12-битный код для передачи его по магистралям ПК.

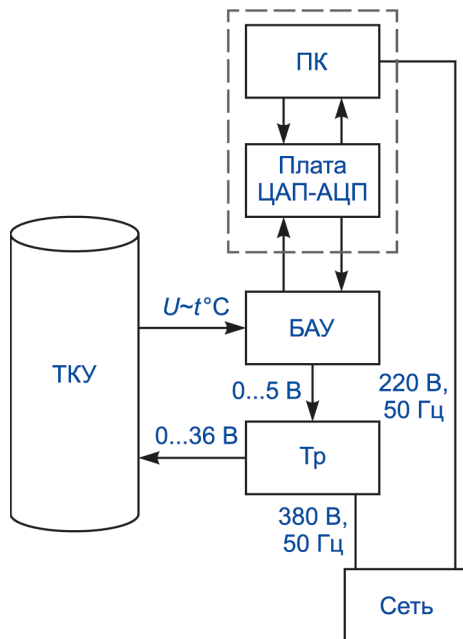


Рис. 1. Схема автоматизированной системы управления температурно-скоростными параметрами термокомпрессионного технологического оборудования:

ТКУ – термокомпрессионная установка; БАУ – блок автоматического управления; Тр – трансформатор тока; ЦАП-АЦП – плата цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразований

Fig. 1. Scheme of an automated system for controlling the temperature-speed parameters of thermocompression technological equipment: TCU – thermocompression unit; ACU – automatic control unit; CT – current transformer; DC – digital converter

Программное обеспечение автоматизированной установки. Неотъемлемой частью автоматизированной системы управления является прикладное программное обеспечение TermoControl 3.1 Alpha, которое обеспечивает автоматизированное управление работой термокомпрессионной установки по заданным, в том числе и ступенчатым, режимам нагрева. Блок-схема прикладной программы TermoControl 3.1 Alpha представлена на рис. 2.

На начальном этапе работы системы для ввода динамики нагрева используются два показателя – контрольное время и заданная для этого времени температура нагрева рабочих и опорных клиньев $T_{тр}$. После нажатия кнопки «Старт» формируется управляющая команда на включение всех ТЭН термокомпрессионного оборудования.

При этом поступающий в ПК сигнал (в виде цифрового кода) блока автоматизированного управления несёт информацию о температуре нагрева рабочих элементов термокомпрессионной установки. Автоматизированная система работает в режиме реального времени. Программа TermoControl 3.1 Alpha сравнивает фактическую температуру $T_{ф}$ нагрева оснастки в месте расположения термопары с требуемой. Если требуемая температура нагрева $T_{тр}$ ещё не достигнута, то программа формирует сигнал на продолжение нагрева в максимальном режиме, в противном случае подаётся команда на отключение подачи напряжения на ТЭН.

Сформированный управляющий сигнал поступает в блок автоматического управления через плату ЦАП-АЦП уже в аналоговом виде. После отключения нагрева программа аналогичным образом следит за понижением температуры, и когда контролируемая температура в месте установки термопары опустится ниже заданного значения, немедленно подаёт управляющую команду на включение элементов нагревательной системы [15].

Данная автоматизированная система показала свою высокую эффективность при деформировании различных металлов и сплавов на конкретных моделях лабораторных термокомпрессионных установок, однако при переходе к промышленному применению системы пришлось столкнуться с рядом проблем [16, 17], в первую очередь – с инерционностью системы. Расположить термоизмерительное устройство (термопару) непосредственно рядом с ТЭН иногда конструктивно невозможно. Кроме того, установка термопар в подвижные рабочие клиновые элементы, непосредственно создающие рабочее усилие, также представляет ряд трудностей. В результате отключённые по команде программы при достижении заданных температур ТЭН и нагретые до более высоких температур, соседние с ТЭН области продолжают за счёт теплопроводности металлов отдавать тепловую энергию клиновидным элементам оборудования. Таким образом, искажаются значения хода штамповой оснастки и, следовательно, температурно-скоростные параметры деформирования [14, 17].

Решение проблемы инерционности. При совершенствовании автоматизированной системы управления исследована поэтапная (ступенчатая) система нагрева, когда с приближением к заданным параметрам температуры

измерительно-управляющая система включала и выключала ТЭН. Программа ThermoControl 3.1 Alpha использовала этот режим только в случае возможного превышения температуры на 10 °С. Однако идея о поэтапном (ступенчатом) нагреве системы оказалась несостоятельной, поскольку крайне сложно было добиться точных режимов деформирования.

Проблема инерционности автоматизированной системы связана с инерционностью нагревательной системы термоупругого пресса. Для решения этой проблемы существует два возможных направления модификации системы:

использовать цифровые экстраполяционные алгоритмы, основанные на экспериментальном снятии фактических характеристик хода рабочих органов установки при воздействии тока в зависимости от его силы и длительности воздействия (наиболее эффективно с точки зрения преодоления инерционности системы);

применить широтно-модульную модуляцию (ШИМ) для управления подачей тока на ТЭН с целью уменьшения интенсивности нагрева при достижении предельных значений требуемой температуры нагрева опорных и рабочих элементов блоков [18].

Метод ШИМ в настоящее время активно применяется для контроля подаваемых напряжения и тока [19, 20]. В качестве несущего колебания служит периодическая последовательность прямоугольных импульсов, а информационным параметром, связанным с дискретным модулирующим сигналом, является длительность этих импульсов [21, 22]. При управлении мощностью нагрева ШИМ пригоден только для инерционных объектов, собственные времена нагрева и остывания таких объектов должны быть гораздо больше периода ШИМ.

С учётом двух описанных направлений возможной модификации автоматизированной системы внесены изменения в аппаратную часть автоматизированного блока управления и в прикладную программу ThermoControl 3.1 Alpha.

Наиболее действенной с точки зрения преодоления инерционности системы в рассматриваемом случае оказалась цифровая экстраполяция работы системы. В результате исследований ряда моделей термокомпрессионных установок и термоупругих прессов теоретически рассчитаны и экспериментально определены удлинения рабочих элементов при различных режимах нагрева. Создана обширная база данных, основанная на результатах прогнозирования хода для термокомпрессионного оборудования различных типов, использование которой позволило с высокой точностью управлять температурно-скоростными режимами деформирования. Отклонения от заданных режимов нагрева составило порядка 2–4 °С, что укладывается в рамки обычной статистической погрешности.

Второй проблемой промышленного использования измерительно-управляющей системы оказался «недружественный» интерфейс управляющей программы ThermoControl 3.1 Alpha в диалоге с пользователем. При переходе на термокомпрессионное оборудование любого нового типа, характеризующегося другими геометрическими параметрами силовых блоков, ввод интенсивности нагрева в виде параметров

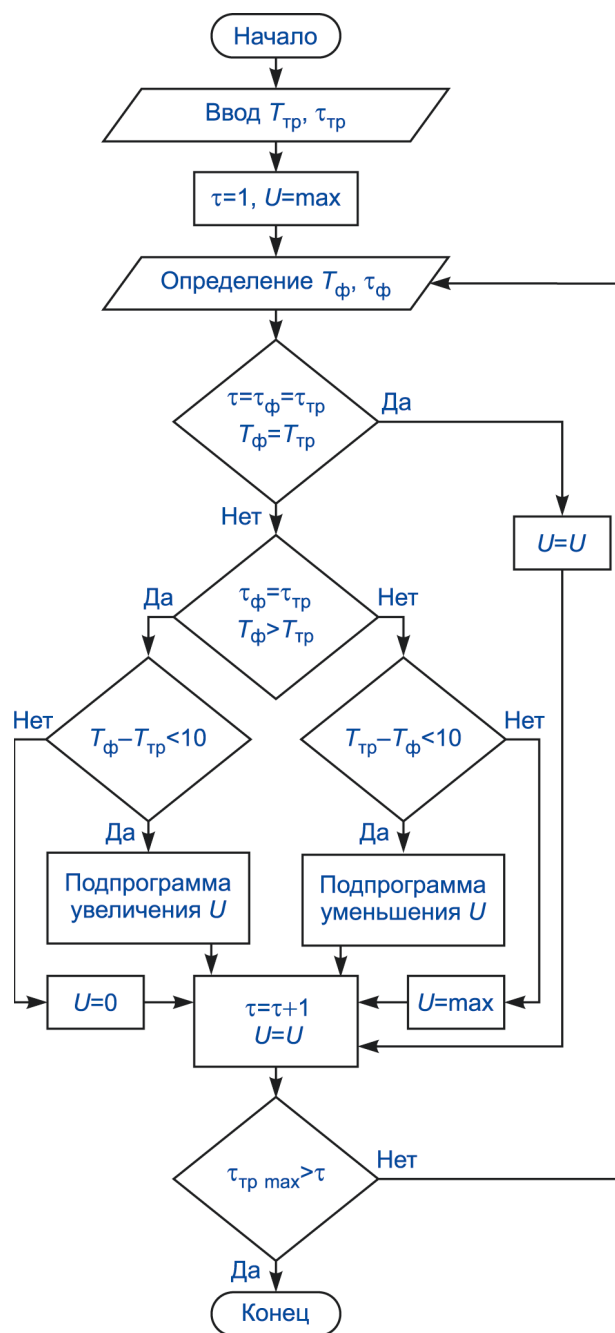


Рис. 2. Блок-схема прикладной программы ThermoControl 3.7 Alpha

Fig. 2. Block diagram of the developed application program ThermoControl 3.7 Alpha

«время – заданная температура» оказался неудобным. Технологи приходилось рассчитывать эти параметры для всего периода штамповки с целью получения заданной скорости движения инструмента на разных этапах процесса.

Программа откорректирована таким образом, чтобы пользователь в начальный момент времени заполнял поля «Тип термокомпрессионной установки», «Материал штамповой оснастки», «Скорость движения инструмента», «Температура деформации», «Размеры штамповой оснастки»,

«Толщина заготовки», а программа по встроенным алгоритмам определяла динамику нагрева и охлаждения термокомпрессионного технологического оборудования. Для этого в программу введены термические коэффициенты линейного расширения сталей, применяемых для изготовления штамповой оснастки и обрабатываемых материалов, геометрические параметры основных видов термоустановок, алгоритмы, учитывающие особенности удлинения силовых элементов термокомпрессионного технологического оборудования и другие необходимые параметры. В результате проведённых работ создана версия TermoControl 3.7 Alpha, что с высокой точностью позволило соблюсти температурно-скоростные параметры штамповки в состоянии сверхпластичности и в условиях изотермической штамповки: отклонение от заданных параметров нагрева (погрешность нагрева) составляла не более 4 °С; погрешность скорости деформирования не более $0,1 \cdot 10^{-3}$ мм/с.

Закключение. В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что основной проблемой, влияющей на точность соблюдения заданных температурно-скоростных параметров деформирования на термоупругих прессах и термокомпрессионных установках при использовании автоматизированной системы управления, является инерционность системы. Несоблюдение точных температурно-скоростных режимов деформирования в условиях штамповки деталей из металлических материалов в состоянии сверхпластичности или при изотермической штамповке приводит к потере устойчивости полотна заготовки, изменению характера течения металла и формированию дефектов формы в виде утяжин, складок, зажимов, что является неисправимым браком.

Выявленная инерционность системы обусловлена конструктивными особенностями термоупругих прессов и термокомпрессионных установок. Основным и наиболее эффективным методом преодоления инерционности оказалось применение цифровых экстраполяционных алгоритмов кратковременного прогнозирования поведения системы. В результате проведённых исследований усовершенствована прикладная программа TermoControl 3.7 Alpha для автоматизированной системы управления работой термоупругих прессов.

Усовершенствованная автоматизированная система управления работой термокомпрессионной установки была опробована для создания точных температурно-скоростных режимов деформирования, позволяющих получать сложные изделия в режимах изотермической штамповки. Система была опробована при получении бездефектных авиационных оребренных панелей и обечаек из алюминиевых сплавов (Д1, Д16) системы Al-Cu-Mg, при получении двухкомпонентных композиционных материалов системы Al-B, а также при изготовлении деталей ответственного назначения из высокопрочных алюминиевых сплавов (B95, B96ц) системы Al-Zn-Mg-Cu.

Список источников

1. Братухин А. Г., Иванов Ю. Л., Марьин Б. Н. и др. Современные технологии авиастроения / Под ред. А. Г. Братухина, Ю. Л. Иванова. М.: Машиностроение, 1999. 832 с.

2. Галкин В. И., Головкина М. Г., Палтиевич А. Р. Прогнозирование распределения механических свойств по объему полуфабрикатов в зависимости от технологических параметров процесса горячей обработки металлов давлением // Металлы. 2017. № 5. С. 96–103.

3. Алиева Л. И. Образование дефектов в процессах холодного выдавливания // Вестник Херсонского национального технического университета. 2016. № 4(59). С. 18–27.

4. Галкин В. И., Палтиевич А. Р., Шелест А. Е. Моделирование и оценка причин возникновения дефектов в процессе изотермической штамповки оребренных панелей из алюминиевых сплавов // Вестник МАИ. 2017. Т. 24. № 3. С. 170–178.

5. Галкин В. И., Васильев В. А., Палтиевич А. Р., Борунова Т. И., Шелест А. Е. К вопросу о возможности управления процессом изотермической штамповки бездефектных оребренных панелей из сплава 1420 // Технология лёгких сплавов. 2017. № 1. С. 84–90.

6. Китаева Д. А., Пазылов Ш. Т., Рудаев Я. И. Температурно-скоростное деформирование алюминиевых сплавов // Прикладная механика и техническая физика. 2016. Т. 57. № 2. С. 182–189. <https://doi.org/10.15372/PMTF20160219>

7. Готлиб Б. М., Вакалюк А. А. Изотермическая штамповка изделий в условиях близких к сверхпластичности // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 4. С. 9–13.

8. Галкин В. И. Конечно-элементный анализ. Возможности и перспективы применения при решении задач обработки металлов давлением / Сборник научных трудов «Современные технологии обработки металлов и сплавов». М.: МАТИ: ИНФРА-М, 2015. С. 112–140.

9. Изаков И. А., Капитаненко Д. В., Сидоров С. А., Чеботарева Е. С. Нагревательные установки для изотермического деформирования. Часть 1. Типы установок // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. № 3. С. 23–32. <https://www.elibrary.ru/rsfvdf>

10. Смирнов О. М. Перспективные процессы формовки сверхпластичных материалов // Металлург. 2010. № 8. С. 29–33.

11. Галкин В. И. Закономерности компактирования и технология производства полых изделий из волокнистых композиционных материалов на металлической основе: дисс. докт. техн. наук, Москва (МАТИ), 1996.

12. Баженов М. Г., Галкин В. И., Жаров М. В., Зверлов Б. В., Лисов А. А., Орлов Л. С. Автоматизированная система управления термокомпрессионной установкой // Измерительная техника. 2003. № 1. С. 37–38.

13. Авиационные материалы. Справочник. В 9 томах. Т. 2. Коррозионные и жаростойкие стали и сплавы. М.: ОНТИ ВИАМ, 1975. 372 с.

14. Жаров М. В. Информационно-измерительная система для управления производственным процессом на термокомпрессионном технологическом оборудовании // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 63. С. 116–121.

15. Жаров М. В. О возможности уточнения режимов штамповки авиапанелей в изотермическом и сверхпластическом состояниях // Технология лёгких сплавов. 2018. № 4. С. 120–126.

16. Петров А. П., Паршиков А. Н., Жаров М. В. Особенности образования дефектов при изотермической штамповке оребренных изделий // Цветные металлы. 2003. № 5. С. 66–70.

17. Петров А. П., Жаров М. В. Программное обеспечение для автоматизации изотермической штамповки с применением термокомпрессионной установки // Технология машиностроения. 2008. № 8. С. 52–54.

18. Rao J. V., Mahesh A., 2017 *International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, Greater Noida, 2017, pp. 1578–1583.

<https://doi.org/10.1109/CCAA.2017.8230055>

19. Prasad K. N. V., Parimita P., Pradhan P., Misra B. and Surekha J., 2017 *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, Vellore, 2017, pp. 1–6.

<https://doi.org/10.1109/IPACT.2017.8245107>

20. He Sh., Chunjiang Q., Yunlei Z., *American Control Conference (ACC)*, 2020, pp. 3653–3658.

<https://doi.org/10.23919/ACC45564.2020.9147452>

21. Шевцов Д. А., Поletaев А. С. Многофазные широтно-импульсные модуляторы для устройств с многоканальным принципом преобразования электроэнергии // Вестник МАИ. 2018. № 1. С. 180–189.

22. Лурье М. С., Лурье О. М., Фролов А. С. Исследование динамических режимов систем стабилизации тока мощных электромагнитов широтно-импульсной модуляцией // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22. № 6. С. 313–320. <https://doi.org/10.17587/mau.22.313-320>

Reference

1. Bratuhin A. G., Ivanov Yu. L., Mar'in B. N. et. al., *Sovremennye tekhnologii aviastroeniya [Modern technologies of aircraft construction]*, Moscow, Mashinostroenie Publ., 1999, 832 p. (In Russ.)

2. Galkin V. I., Golovkina M. G., Paltievich A. R., *Russian metallurgy (Metally)*, 2017, no. 9, pp. 764–770.

<https://doi.org/10.1134/S0036029517090051>

3. Alieva L. I., Forming of defect parts in cold extrusion processes, *Vestnik Hersonskogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 4(59), pp. 18–27. (In Russ.)

4. Galkin V. I., Paltievich A. R., Shelest A. E., Modeling and evaluation of defects occurrence reasons while isothermal punching of ribbed panels from aluminum alloys, *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 170–178. (In Russ.)

5. Galkin V. I., Vasil'ev V. A., Paltievich A. R., Borunova T. I., The possibility of managing the process of isothermal forging free-defect ribbed panels of 01420 alloy, *Technology of Light Alloys*, 2017, no. 1, pp. 84–90. (In Russ.)

6. Kitaeva D. A., Pazylov Sh. T., Rudaev Ya. I., *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2016, vol. 57, no. 2, pp. 352–358. <https://doi.org/10.1134/S002189441602019X>

7. Gotlib B. M., Vakalyuk A. A., Isothermal die forging in superplasticity conditions, *Modern High Technologies*, 2019, no. 4, pp. 9–13. (In Russ.)

8. Galkin V. I., Konechno-elementnyj analiz. Vozможности i perspektivy primeneniya pri reshenii zadach obrabotki metallov davleniem, *Collection of scientific papers "Sovremennye tekhnologii obrabotki metallov i splavov"*, Moscow, INFRA-M Publ., 2015, pp. 112–140. (In Russ.)

9. Izakov I. A., Kapitanenko D. V., Sidorov S. A., Chebotareva E. S., Heat systems used for isothermal forging. Part 1. Types. Forging and stamping production, *Processing of materials by pressure*, 2019, no. 3, pp. 23–32. (In Russ.)

10. Smirnov O. M., *Metallurgist*, 2010, vol. 54, no. 8, pp. 491–497. <https://doi.org/10.1007/s11015-010-9329-7>

11. Galkin V. I., Doctoral dissertation technical sciences, Moscow (MATI), 1996. (In Russ.)

12. Bazhenov M. G., Galkin V. I., Zharov M. V., Zverlov B. V., Lisov A. A., Orlov L. S., *Measurement Techniques*, 2003, vol. 46, no. 1, pp. 56–58.

<https://doi.org/10.1023/A:1023465623044>

13. *Aviacionnye materialy [Aviation materials]*, Guide in 9 volumes, vol. 2, Moscow, ONTI VIAM Publ., 1975, 372 p. (In Russ.)

14. Zharov M. V., Information measuring system to control production process with thermal compressive processing equipment, *Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2018, no. 63, pp. 116–121. (In Russ.)

15. Zharov M. V., On closer definition of forging conditions of aviation-purposed panels in case of isothermal forging and forging of metals in the superplastic state, *Technology of Light Alloys*, 2018, no. 4, pp. 120–126. (In Russ.)

16. Petrov A. P., Parshikov A. N., Zharov M. V., Osobennosti obrazovaniya defektov pri izotermicheskoy shtampovke orebrennykh izdelij, *Tsvetnye metally*, 2003, no. 5, pp. 66–70. (In Russ.)

17. Petrov A. P., Zharov M. V., Software for automatization of the isothermal pressure forming using thermocompressor, *Tekhnologiya mashinostroyeniya*, 2008, no. 8, pp. 52–54. (In Russ.)

18. Rao J. V., Mahesh A., 2017 *International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, Greater Noida, 2017, pp. 1578–1583.

<https://doi.org/10.1109/CCAA.2017.8230055>

19. Prasad K. N. V., Parimita P., Pradhan P., Misra B. and Surekha J., 2017 *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, Vellore, 2017, pp. 1–6.

<https://doi.org/10.1109/IPACT.2017.8245107>

20. He Sh., Chunjiang Q., Yunlei Z., *American Control Conference (ACC)*, 2020, pp. 3653–3658.

<https://doi.org/10.23919/ACC45564.2020.9147452>

21. Shevcov D. A., Poletaev A. S., Multiphase pulse-width modulators for devices with a multichannel principle of electric power conversion, *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 180–189. (In Russ.)

22. Lur'e M. S., Lur'e O. M., Frolov A. S., Study of dynamic modes of current stabilization systems of powerful electromagnets with pulse-width modulation, *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 6, pp. 313–320. (In Russ.)

<https://doi.org/10.17587/mau.22.313-320>

Статья поступила в редакцию 03.06.2022; одобрена после рецензирования 24.10.2022; принята к публикации 25.10.2022.
The article was submitted 03.06.2022; approved after reviewing 24.10.2022; accepted for publication 25.10.2022.

Методика коррекции температурной погрешности преобразователя влажности с цилиндрическим электродом

Тулкун Закирович Насиров^{1, 2✉}, Хамдам Шаймардонович Жабборов²

¹ Университет геологических наук, Ташкент, Республика Узбекистан

² Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ташкент, Республика Узбекистан

¹tulkunnasirov@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3813-1252>

²hamdam@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0104-0229>

Аннотация. Проанализированы способы повышения точности измерения влажности сыпучих материалов (зерна и зернопродуктов) влагомерами с различными преобразователями влажности. Разработан ёмкостный преобразователь влажности с цилиндрическим электродом, реализующий аддитивно-логометрическую схему коррекции температурной погрешности. Данную схему также можно использовать и в ёмкостных преобразователях с нецилиндрическими электродами. Экспериментально получена зависимость реактивного сопротивления преобразователя влажности от электрической ёмкости в процессе работы влагомера с сыпучими материалами. Показано, что при ёмкости преобразователя влажности 2 пФ реактивное сопротивление резко уменьшается, а далее с увеличением ёмкости плавно уменьшается. Исследована функциональная зависимость чувствительности ёмкостного преобразователя влажности с цилиндрическим электродом от реактивного сопротивления и показано, что чувствительность уменьшается с увеличением реактивного сопротивления. Максимальная чувствительность ёмкостного преобразователя влажности сыпучих материалов достигается при реактивном сопротивлении $0,5 \cdot 10^4$ Ом, что соответствует максимальному значению электрической ёмкости преобразователя. Полученные результаты можно применять при проектировании основных элементов преобразователя влажности с цилиндрическим электродом, входящего в состав влагомеров для измерения влажности зерна и зернопродуктов.

Ключевые слова: температурная погрешность, ёмкостный преобразователь влажности, цилиндрический электрод, сыпучие материалы, аддитивно-логометрическая схема

Финансирование: работа выполнена при поддержке совместного гранта № ИЛ432684105 Республики Узбекистан и Республики Беларусь.

Для цитирования: Насиров Т. З., Жабборов Х. Ш. Методика коррекции температурной погрешности преобразователя влажности с цилиндрическим электродом // Измерительная техника. 2022. № 12. С. 52–57. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-52-57>

The correction scheme of temperature errors in the moisture meter transformer with cylindrical electrodes

Tulkun Z. Nasirov^{1, 2✉}, Khamdam Sh. Jabborov²

¹ Geological Sciences University, Tashkent, Uzbekistan

² Islam Karimov Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

¹tulkunnasirov@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3813-1252>

²hamdam@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0104-0229>

Abstract. The aim of carried out investigations is the analysis of a different correction errors circuit of temperature in the moisture transformer with a cylindrical electrode in point of view increasing the measurements accuracy of grain and grain products moisture. The measurement accuracy in the moisture transformer depends on the constructive technological features, effective working possibilities and static characteristics linearity degree of its consisting elements. At the same time, an additive logo metric circuit, which can also be used in other capacitive transformers, has been considered. Using experimental method the dependence of the reactive resistance of cylindrical transformer on the capacity of cylindrical transformer in process of working with bulk materials has been obtained. We showed that when one is working with bulk materials the reactive resistance is decreased down sharply and at the same time the cylindrical transformer capacity value reaches the value 2 pF. Further, the reactive resistance is decreasing slowly on the capacity that demonstrates the change of the transformer sensitivity too. The functional dependence of capacity moisture transformer with cylindrical electrode sensitivity on the reactive resistance has been studied. Novelty of the carried out investigations in that we revealed the concrete value of moisture transformer capacity in which the sensitivity of the measuring device will be the highest value. It has been revealed that when the reactive resistance of the cylindrical transformer is growing then its sensitivity is decreasing. The maximal cylindrical transformer sensitivity reaches when the reactive resistance equals to $0.5 \cdot 10^4$ Ohm which corresponds to maximal change of the moisture transformer capacity when we working with bulk materials. It has been shown that

the additive-logo metric circuit can be used for increasing accuracy of the grain and grain products moisture on the common reactive resistance $0.5 \cdot 10^4$ Ohm which allows reach the measuring device maximal sensitivity. All these conclusions we must take into account on projecting the basic elements of the transformer with cylindrical electrode for grain and grain products moisture.

Keywords: temperature errors, moisture capacity transformer, cylindrical electrode, bulk materials, additive-logo metric circuit

Financial Support: the work was supported by Uzbekistan-Belarus joint grant IL432684105.

Введение. Диэлькометрические влагомеры разнообразных конструкций широко распространены, что обусловлено высоким быстродействием, малой энергоёмкостью и простотой конструкций данных устройств, а также возможностью их включения в системы автоматического управления [1]. Объекты измерений при этом – от листового металла до сыпучих растительных материалов, достигаемые значения определяемого содержания воды – от миллионных долей (ppm) до 100 %. Точность ёмкостного преобразователя влажности влагомера зависит от конструктивно-технологических особенностей и эффективной работы элементов преобразователя, а также степени линейности его статической характеристики. При модернизации диэлькометрических влагомеров совершенствуются как основные элементы преобразователя, например источники поля и чувствительные элементы, так и элементы обработки измерительной информации, поступающей от ёмкостного преобразователя влажности [2–5].

Статические погрешности ёмкостного преобразователя с цилиндрическим электродом минимизируются высокоэффективными современными методами уменьшения случайной составляющей погрешности при обработке выходных сигналов преобразователя. При минимизации инструментальной погрешности измерений используется метод введения в измерительную цепь элементов коррекции погрешностей. Как показывают результаты экспериментальных исследований [5], изменение температуры среды из-за изменений характеристик объекта измерения или геометрических размеров, структуры и характеристик преобразователя приводит к значительному уменьшению точности измерения. Однако ёмкостный преобразователь может работать в достаточно широком температурном диапазоне [6].

При разработке влагомеров, содержащих ёмкостные преобразователи влажности с цилиндрическим электродом, следует учитывать существенную погрешность, обусловленную возможным изменением геометрических размеров преобразователя под воздействием температуры. Для компенсации этой погрешности в измерительную схему подключается зависящий от температуры конденсатор C_T . Поэтому для ёмкостного преобразователя влагомера с цилиндрическим электродом необходимо разрабатывать коррекционные схемы для контроля изменений температуры.

В работе [7] проанализированы математические модели диэлектрической проницаемости гетерогенных влажных систем и способы повышения надёжности и точности результатов диэлектрического регулирования влажности материалов. Рассмотрены вопросы проектирования высокочастотной системы и устройств контроля влажности

на основе ёмкостных измерительных преобразователей. Модель зависимости диэлектрических свойств зерна от влажности учитывает изменения температуры и позволяет оценить степень и характер влияния поляризационного фактора на общую погрешность измерения влажности зерна и, следовательно, модель можно использовать для внесения необходимых поправок в результат измерения.

Математическому описанию разработки ёмкостных преобразователей влажности в последние годы посвящён ряд работ. Например, в работе [8] предложены две наиболее эффективные для контроля влажности зерна и зернопродуктов физические модели ёмкостных преобразователей. В [9] предложен алгоритм численного анализа работы исследуемого устройства, обеспечивающий получение значений предельно допустимых инструментальных погрешностей изготовления элементов преобразователя. В [10–12] предложена математическая модель высокочастотного влагомера хлопковых семян, в котором простейшая двухэлементная RC -схема замещения наиболее близко соответствует реальному описанию объекта измерения в диапазоне частот 10^5 – 10^8 Гц.

Цель исследований – анализ схемы коррекции температурной погрешности ёмкостного преобразователя влажности с цилиндрическим электродом (далее – цилиндрического преобразователя) для повышения точности измерения влажности зерна и зернопродуктов. Настоящее исследование является логическим продолжением изучения высокочастотных влагомеров в [10–12]. Выбор ёмкостного преобразователя обусловлен тем, что даже незначительное изменение влажности зерна оказывает существенное влияние на значение электрической ёмкости преобразователя, что позволяет контролировать влажность зернопродуктов при технологических процессах. Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

получить и проанализировать зависимость реактивного сопротивления цилиндрического преобразователя от ёмкости зерна и зернопродуктов;

исследовать зависимость чувствительности цилиндрического преобразователя от реактивного сопротивления аддитивно-логометрической схемы коррекции изменения температуры;

выявить область значений реактивного сопротивления использованной схемы с максимальной чувствительностью цилиндрического преобразователя.

Аддитивно-логометрическая схема коррекции. Исследования проводили в лабораторных условиях. При исследованиях использовали разработанный авторами настоящей статьи ёмкостный цилиндрический преобразователь

с мультипликативной коррекцией изменения температуры, при которой внутренняя и опорная ёмкости подключаются последовательно к измерительному преобразователю, а установленные напряжения управляются схемой обратной связи операционного усилителя. В работе [13] рассмотрены несколько вариантов коррекции погрешностей, связанных с изменением геометрических размеров преобразователя в широком интервале изменения температуры окружающей среды. В частности, описана схема мультипликативной коррекции погрешности, недостатки которой обусловлены конечным значением коэффициента усиления усилителей и ёмкостью кабеля, шунтирующей входное сопротивление усилителя. Также в [13] рассмотрена усовершенствованная схема аддитивно-логометрической коррекции изменения температуры и геометрических размеров измерительного устройства. Преимущество усовершенствованной схемы состоит в аддитивной коррекции изменения температуры и рабочей, и опорной ёмкостей с последующим выделением полученных результатов аддитивной коррекции. Однако и эта схема не лишена недостатков: наблюдается фазовый сдвиг выходного напряжения измерительной цепи $U_{\text{ВЫХ}}$ по сравнению с входным напряжением $U_{\text{ВХ}}$, что требует устойчивости измерительной цепи. В настоящей работе предложена схема, свободная от указанных недостатков, поскольку обратная связь не вносит фазового сдвига в выходное напряжение измерительной цепи $U_{\text{ВЫХ}}$ (рис. 1).

Операционные усилители ОУ1, ОУ2 работают в режиме среднеквадратичного расчёта результатов измерения. Ёмкости C_0 (начальное значение рабочей ёмкости параметрического преобразователя влажности), C_x (ёмкость, которая учитывает изменение расстояния между пластинами ёмкостного преобразователя с цилиндрическим электродом за счёт изменения температуры датчика), C_K (ёмкость соединительных кабелей), C_t создают сдвиг по фазе сигнала, обеспечивают стабильную работу схемы коррекции за счёт последовательно соединённых дифференциатора ОУ1 и интегратора ОУ2. Элемент аддитивно-логометрической коррекции температурной погрешности C_t , соединённый с входной цепью операционного усилителя ОУ2, даёт среднеквадратичное значение корректируемого сигнала.

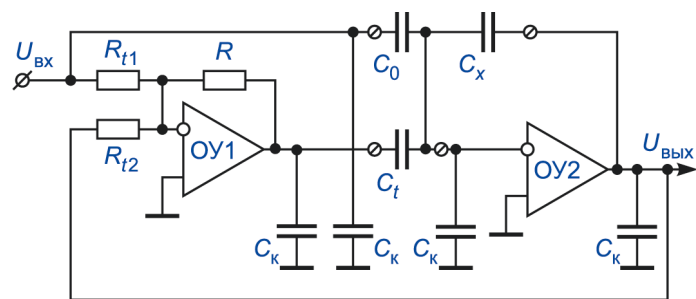


Рис. 1. Аддитивно-логометрическая схема с совместной коррекцией температурной погрешности и погрешности измерения влажности

Fig. 1. Additive-logo metric scheme combining correction temperature errors and moisture measurements

Погрешность операционного усилителя ОУ1 определяется значениями его основных параметров и резисторов R , R_{t1} , R_{t2} (по которым настраивается аддитивная коррекция погрешностей), так как после настройки они остаются неизменными, и можно корректировать погрешность, связанную со сложением сигналов. Коэффициент отрицательной обратной связи операционного усилителя ОУ2 выражается как

$$\beta = C_x(C_x + C_0 + C_t + C_K) \quad (1)$$

и не даёт сдвига по фазе негативной обратной связи в выходное напряжение измерительной цепи, таким образом выходное напряжение остаётся неизменным.

Как при мультипликативной коррекции погрешности температуры цилиндрического преобразователя влажности, так и при аддитивно-логометрической коррекции, модель влагомера, основанная на C_x , C_0 , должна иметь линейную зависимость от температуры t :

$$\begin{cases} C_x(t) = C_{x0}(1 + \alpha_x t); \\ C_0(t) = C_{00}(1 + \alpha_0 t); \end{cases} \quad (2)$$

где C_{x0} , C_{00} – значения ёмкостей C_x , C_0 при температуре 0°C ; α_x , α_0 – температурные коэффициенты параметров C_x , C_0 соответственно.

Температурная зависимость ёмкости C_t при высоких ($t > 100^\circ\text{C}$) температурах имеет вид

$$C_t(t) = C_{t0}(1 + \alpha_t t), \quad (3)$$

где C_{t0} , α_t – ёмкость при температуре 0°C и температурный коэффициент ёмкости.

Таким образом, с практической точки зрения важны схемы коррекции изменения температуры, разработанные в целях повышения точности цилиндрического преобразователя влагомера. Аддитивно-логометрическую схему коррекции изменения температуры (см. рис. 1), использованную в ёмкостном цилиндрическом преобразователе влажности, можно реализовывать и в нецилиндрических ёмкостных преобразователях при измерениях влажности зерна и зернопродуктов.

Чувствительность цилиндрического ёмкостного преобразователя влажности. Создание автоматизированных систем управления, широко распространённых при комплексной автоматизации производственных процессов и в вычислительной технике, зачастую требует применения нескольких измерительных преобразователей, различающихся физическими характеристиками и принципами действия. В связи с этим возрастают требования, предъявляемые к надёжности системы измерений и её элементов.

Из анализа экспериментальных данных [14] следует, что основными критериями чувствительности и надёжности цилиндрических преобразователей влажности являются точность (погрешность) измерения и нелинейность статических характеристик преобразователя. Также необходимо учитывать, что поляризационные эффекты, появляющиеся

в процессе работы цилиндрического преобразователя, а именно смещение электрических зарядов между электродами, приводят к сокращению измерительного интервала и существенному снижению чувствительности преобразователя влажности сыпучих материалов, особенно для случая малых (в пределах 0,1 %) изменений влажности.

В качестве характеристик ёмкостного преобразователя рассмотрим абсолютную S_1 и относительную S_2 чувствительности. Абсолютная чувствительность определяется отношением приращения выходного сигнала преобразователя ΔU к приращению его входного сигнала ΔU_0 [15]:

$$S_1 = \Delta U / \Delta U_0. \quad (4)$$

Относительную чувствительность можно рассчитать как отношение либо абсолютного ΔU , либо относительного $\Delta U/U$ приращений выходного сигнала преобразователя к относительному приращению входного сигнала $\Delta U_0/U_0$:

$$S_2 = \Delta U (\Delta U_0 / U_0)^{-1}; \quad (5)$$

$$S_2 = (\Delta U / U) (\Delta U_0 / U_0)^{-1}. \quad (6)$$

Экспериментально показано [14], что из приведённых выше выражений (4)–(6) только выражение (6) всесторонне характеризует чувствительность изменения выходного сигнала цилиндрического преобразователя.

Рассмотрим измерительную схему, состоящую из двух параллельно соединённых конденсаторов и высокочастотного импульсного (квазирезонаторного) генератора, где ёмкость преобразователя C_n в выходной цепи заменим дифференциальной чувствительностью S к эквивалентной ёмкости $C_{\text{ЭКВ}}$:

$$C_{\text{ЭКВ}} = C_n + C_0; \quad (7)$$

$$S = (\partial U / \partial U_0) (U_0 / U). \quad (8)$$

Эквивалентное комплексное сопротивление на выходе цилиндрического ёмкостного преобразователя $Z_{\text{ЭКВ}}$ определяется из выражения:

$$Z_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_n r_n^2}{R_n^2 + r_n^2} - \frac{j[R_n^2(r_n - r_{\text{и}}) - r_n^2 r_{\text{и}}]}{R_n^2 + r_n^2}, \quad (9)$$

где R_n , r_n – активное и ёмкостное (реактивное) сопротивление преобразователя соответственно; $r_{\text{и}}$ – ёмкостное сопротивление изоляционной поверхности.

Проанализируем чувствительность рассматриваемого цилиндрического ёмкостного преобразователя. Согласно выражению (8) критерий максимальной чувствительности преобразователя определяется дифференциальной чувствительностью включённого в эквивалентную схему ёмкостного преобразователя:

$$\left. \begin{aligned} S_{R_n} &= [(\partial Z_{\text{ЭКВ}} / \partial R_n)(R_n / Z_{\text{ЭКВ}})] \rightarrow \min; \\ S_{r_n} &= [(\partial Z_{\text{ЭКВ}} / \partial r_n)(r_n / Z_{\text{ЭКВ}})] \rightarrow \max. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Первое и второе выражения (10) определяют чувствительность к активному и реактивному сопротивлениям соответственно.

С учётом выражения (9) можно записать

$$Z_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{[R_n^2(r_n + r_{\text{и}}) + r_n^2 r_{\text{и}}^2](r_n^2 + r_{\text{и}}^2)^{-1}}. \quad (11)$$

Для нахождения чувствительности цилиндрического ёмкостного преобразователя продифференцируем выражение (11) по R_n :

$$\frac{\partial Z_{\text{ЭКВ}}}{\partial R_n} = \frac{R_n r_n^2 (r_n^2 + 2r_n r_{\text{и}})}{\sqrt{[R_n^2(r_n + r_{\text{и}}) + r_n^2 r_{\text{и}}^2](R_n^2 + r_{\text{и}}^2)}}. \quad (12)$$

Таким образом, чувствительность цилиндрического ёмкостного преобразователя можно записать как

$$S_{R_n} = \frac{\partial Z_{\text{ЭКВ}}}{\partial R_n} \frac{R_n}{Z_{\text{ЭКВ}}} = \frac{R_n^2 r_n^2 (r_n^2 + 2r_n r_{\text{и}})}{[R_n^2(r_n + r_{\text{и}}) + r_n^2 r_{\text{и}}^2](R_n^2 + r_{\text{и}}^2)}, \quad (13)$$

где $R_{\text{и}}$ – активное сопротивление изоляционной поверхности.

Из соотношения (13) следует, что чувствительность преобразователя является функцией одновременно трёх переменных, что осложняет расчёты. Поэтому введём обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \eta &= r_{\text{и}} / r_n; \\ \beta_n &= R_n / r_n = \omega C_n R_n, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где ω – частота электрических колебаний цепи, и перейдём к относительным величинам. С учётом замены (14) выражение (13) примет вид

$$S_{R_n} = \frac{\beta_n^2 (1 + 2\eta)}{\beta_n^2 (1 + \eta)^2 + \eta^2 (1 + \beta_n^2)}. \quad (15)$$

Согласно соотношениям (14) коэффициенты η , β_n характеризуют соответственно особенности измерений влажности сыпучих материалов в цилиндрическом ёмкостном преобразователе и пригодность материала для измерений ёмкостным преобразователем (добротность). Из (15) следует, что чувствительность ёмкостного преобразователя в основном зависит от параметров β_n , η . Как показывают наблюдения и расчёты [14], с увеличением η , который зависит от реактивного сопротивления сыпучих материалов и изоляционного покрытия, чувствительность преобразователя существенно уменьшается. С физической точки зрения это означает значительное изменение реактивного сопротивления и добротности в результате взаимодействия сыпучих материалов с электрическим потоком в цилиндрическом ёмкостном преобразователе. Также в соответствии с (15) при увеличении добротности материала повышается чувствительность цилиндрического преобразователя.

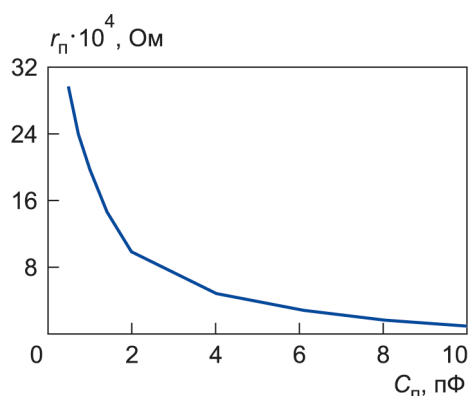


Рис. 2. Зависимость реактивного сопротивления r_n цилиндрического преобразователя влагомера от ёмкости C_n

Fig. 2. Dependence of the reactive resistance of the cylindrical transformer on the transformer equipment capacitance

Отсюда следует, что чувствительность преобразователя зависит непосредственно от характеристик колебательного контура измерительного генератора.

На рис. 2 приведена зависимость $r_n(C_n)$ реактивного сопротивления от ёмкости преобразователя. При измерении влажности зерна реактивное сопротивление резко падает при достижении значения ёмкости, равного 2 пФ, и далее уменьшается более плавно с увеличением ёмкости, что также свидетельствует об изменении чувствительности преобразователя.

Согласно рис. 3 чувствительность S_n преобразователя влажности монотонно уменьшается с увеличением реактивного сопротивления r_n . Максимальная чувствительность цилиндрического преобразователя достигается при $r_n = 0,5 \cdot 10^4$ Ом что соответствует максимальному изменению ёмкости сыпучих материалов. Кроме того, если при реактивном сопротивлении $r_n = 0,5 \dots 15$ Ом чувствительность изменяется сравнительно медленно, то при $r_n > 15$ Ом чувствительность существенно снижается.

Обсуждение результатов. Согласно полученным результатам при измерении влажности сыпучих материалов с увеличением ёмкости реактивное сопротивление преобразователя с цилиндрическим электродом уменьшается вначале резко при значении 2 пФ и далее плавно, что свидетельствует об увеличении чувствительности преобразователя.

Таким образом, статические погрешности преобразователя влагомера с цилиндрическим электродом уменьшаются путём выбора максимального значения ёмкости преобразователя влажности, при котором минимизируется случайная погрешность, связанная с корреляцией входного сигнала. Минимизация инструментальной погрешности измерений реализуется введением в измерительную цепь элементов R_{11} , R_{12} для учёта изменения активного сопротивления при изменении температуры сыпучих материалов – объектов измерений влажности. Таким способом погрешности измерения значительно уменьшаются в широком интервале изменения температуры [6] при обеспечении высокой надёжности работы устройства [9, 16]. Увеличение надёжности связано с тем, что повышению влажности материала

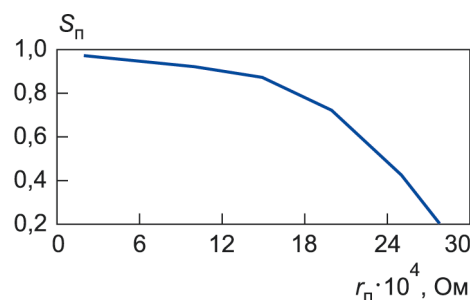


Рис. 3. Функциональная зависимость чувствительности S_n преобразователя от реактивного сопротивления r_n

Fig. 3. Functional characteristic of sensitivity on the reactive resistance

до некоторого заданного значения соответствует существенное изменение ёмкости преобразователя, которое, в свою очередь, управляет передачей соответствующего сигнала в систему управления технологическим процессом.

Заключение. Из анализа результатов исследований аддитивно-логометрической схемы, направленных на повышение точности измерений влажности зерна и зернопродуктов с учётом изменения реактивного сопротивления основных элементов схемы в зависимости от температуры окружающей среды, следует, что предложенная схема эффективна при значении общего реактивного сопротивления $0,5 \cdot 10^4$ Ом, при котором достигается максимальная чувствительность измерительного устройства. Полученные результаты будут полезны при проектировании основных элементов ёмкостного преобразователя влажности с цилиндрическим электродом, входящего в состав влагомера для измерения влажности зерна и зернопродуктов.

Список источников

1. Коряков В. И., Запорожец А. С., Ексина М. В., Пархоменко Г. В. Эффективность внедрения новой системы поверки ёмкостных влагомеров зерна на базе применения стандартных образцов // Метрология и точные измерения. 1978. № 9. С. 5–14.
2. Kumar Sh., Kumar K., Islam T., *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, vol. 329, 128908. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128908>
3. Грачев А. В. Анализ погрешностей измерительной схемы преобразователей параметров индуктивного датчика // Измерение, мониторинг, управление, контроль. 2018. 3 (25). С. 79–85. <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2018-3-10>
4. Куцевол О. М. Диэлектрометрический влагомер зерна // Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. 2015. 1 (50). С. 44–47.
5. Усманова Х. А., Парпиев М. П., Абдурахманов О. Х., Тургунабаев А. Сверхвысокочастотный преобразователь влажности сыпучих и волокнистых материалов // Приборы. 2020. № 3(237). С. 33–38.
6. Uljayev E., Ubaydullayev U. M., Narzullayev Sh. N., *Chemical Technology, Control and Management*, 2020, vol. 4(94), pp. 23–30. <https://doi.org/10.34920/2020.5-6.29-32>

7. Kalandarov P. I., Mukimov Z. M., Logunova O. S., *Technical Science and Innovation*, 2021, no. 2, 5.
8. Кулуев Р. Р., Матякубова П. М. Разработка математических моделей ёмкостных преобразователей влажности зерна и зерновых продуктов // Метрология и приборостроение. 2021. 3 (94). С. 8–12.
9. Гречишников В. М., Комаров Е. Г. Математическая модель функционирования мультисенсорного преобразователя бинарных механических сигналов в электрические на основе волоконно-оптического цифроаналогового преобразователя // Измерительная техника. 2020. № 2. С. 20–28. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-2-20-28>
10. Nasirov T. Z., Jabborov Kh. Sh., *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2022, vol. 10(2), pp. 57–63. <https://doi.org/10.11648/j.jeee.20221002.13>
11. Насиров Т. З., Исмагуллаев П. Р., Жабборов Х. Ш. Математическая модель высокочастотного влагомера хлопковых семян на основе схем замещения // Метрология. 2020. № 9. С. 53–70. <https://doi.org/10.32446/0132-4713.2020-3-53-70>
12. Насиров Т. З., Исмагуллаев П. Р., Жабборов Х. Ш. Расчёт ёмкости конусного преобразователя влагомера зерна и зернопродуктов // Приборы. 2019. № 4. С. 11–16.
13. Арбузов В. П., Мишина М. А. Коррекция температурной погрешности ёмкостных датчиков давления // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. 3(43). С. 94–105. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2017-3-8>
14. Жабборов Х. Ш., Бобоев Г. Г., Насимхонов Л. Н. Проектирование ёмкостных цилиндрических преобразователей влажности сыпучих материалов по критерию чувствительности и надёжности элементов // Приборы. 2017. № 5(203). С. 8–13.
15. Острейковский В. А. Теория надёжности: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2003. 463 с.
16. Yang Jie, Deng Xuan, Liu Qingquan, Ding Renhui, *Meteorological applications*, 2020, vol. 27(6), pp. 1–12. <https://doi.org/10.1002/met.1972>
2. Kumar Sh., Kumar K., Islam T., *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, vol. 329, 128908. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128908>
3. Grachev A. V., Analysis of errors of measurement scheme of inductive sensor parameters transformers, *Measuring. monitoring. Management. Control*, 2018, no. 3(25). pp. 79–85. (In Russ.)
4. Kutsevol O. M., Dielectric measuring instrument of humidity of grain, *Measuring and computing equipment in technological processes*, 2015, no. 1(50). pp. 44–47. (In Russ.)
5. Usmanova X. A., Parpiyev M. P., Abduraxmanov O. X., Turgunbayev A., Super High frequency transformer of moisture of bulk and fibrous materials, *Pribory*, 2020, no. 3(237), pp. 33–38. (In Russ.)
6. Uljayev E., Ubaydullayev U. M., Narzullayev Sh. N., *Chemical Technology, Control and Management*, 2020, vol. 4(94), pp. 23–30. <https://doi.org/10.34920/2020.5-6.29-32>
7. Kalandarov P. I., Mukimov Z. M., Logunova O. S., *Technical Science and Innovation*, 2021, no. 2, 5.
8. Kuluyev P. P., Matyagubova P. M., Development of mathematical models of capacity transformers of moisture of grain and grain products, *Metrology and Instrument-Making*, 2021, no. 3(94), pp. 8–12. (In Russ.)
9. Grechishnikov V. M., Komarov E. G., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 96–105. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01756-6>
10. Nasirov T. Z., Jabborov Kh. Sh., *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2022, vol. 10(2), pp. 57–63. <https://doi.org/10.11648/j.jeee.20221002.13>
11. Nasirov T. Z., Ismatullayev P. R., Jabborov Kh. Sh., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 9, pp. 758–764. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01851-2>
12. Nasirov T. Z., Ismatullayev P. R., Jabborov Kh. Sh., Calculation of capacitance for cone transformer of grain and grain products moisture, *Pribory*, 2019, no. 4. pp. 11–16. (In Russ.)
13. Arbuzov V. P., Mishina M. A., Correction of capacitive pressure sensor's temperature error, *Izvestiya visshix uchebnix zavedeniy. Povoljskii region. Texnicheskiye nauki*, 2017, no. 3(43), pp. 94–105. (In Russ.) <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2017-3-8>
14. Jabborov Kh. Sh., Boboyev G. G., Nasimxonov L. N., Projection of the capacitance cylindrical transformers of moisture of bulk materials on the elements sensitivity and reliability criteria, *Pribory*, 2017, no. 5(203), pp. 8–13. (In Russ.)
15. Ostreykovskii V. A., *The reliability theory: textbook*, Moscow, Vishshaya shkola Publ., 2003, 463 p. (In Russ.)
16. Yang Jie, Deng Xuan, Liu Qingquan, Ding Renhui, *Meteorological applications*, 2020, vol. 27(6), pp. 1–12. <https://doi.org/10.1002/met.1972>

References

Статья поступила в редакцию 12.07.2022; одобрена после рецензирования 02.08.2022; принята к публикации 15.08.2022.
The article was submitted 12.07.2022; approved after reviewing 02.08.2022; accepted for publication 15.08.2022.

Эквивалентный размер и акустический центр измерительного гидрофона

Александр Евгеньевич Исаев^{1✉}, Булат Ильгизович Хатамтаев²

1, 2 Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

¹isaev@vniiftri.ru✉

²bulat_3004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8197-8160>

Аннотация. Рассмотрена проблема, возникающая при амплитудно-фазовой калибровке гидрофонов методом взаимности и заключающаяся в нарушении согласованности характеристик гидрофона, которые указывает производитель. Нарушение указанной согласованности характеристик обусловлено необходимостью определять фазочастотную характеристику при калибровке гидрофона. Размеры приёмной части гидрофона и положение акустического центра производитель устанавливает по чертежу приёмной части и тем самым подменяет акустические параметры геометрическими. Для восстановления согласованности характеристик предложено определять положение акустического центра и эквивалентный размер приёмной части гидрофона по результатам акустических измерений. Показано, что смещение акустического центра гидрофона относительно его геометрического центра – характерное явление, а геометрический и измеренный акустически размеры активного элемента могут различаться. Для обеспечения единства акустических измерений предложено ввести понятие эквивалентного радиуса и уточнить понятие акустического центра гидрофона, а также стандартизовать способы их экспериментального нахождения. Полученные результаты актуальны для различных приложений (в том числе, экология моря, медицинские ультразвуковые исследования) при контроле фазовых характеристик элементов гидроакустических антенн различного назначения, при обеспечении идентичности фазочастотных характеристик измерительных каналов векторных приёмников и при решении задач, связанных с восстановлением формы акустического сигнала по напряжению, зарегистрированному на выходе приёмника.

Ключевые слова: гидрофон, амплитудно-фазовая калибровка, метод взаимности, акустический центр гидрофона, эквивалентный радиус активного элемента

Для цитирования: Исаев А. И., Хатамтаев Б. И. Эквивалентный размер и акустический центр измерительного гидрофона // Измерительная техника. 2022. № 12. С. 58–63. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-58-63>

Equivalent size and acoustic center of measuring hydrophone

Alexander E. Isaev^{1✉}, Bulat I. Khatamtaev²

^{1, 2} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region, Russia

¹isaev@vniiftri.ru✉

²bulat_3004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8197-8160>

Abstract. The problem that arises during the amplitude-phase calibration of hydrophones by the reciprocity method and consists in the violation of the consistency of the hydrophone characteristics specified by the manufacturer is considered. Violation of the indicated consistency of characteristics is due to the need to determine the phase-frequency characteristic when calibrating the hydrophone. The manufacturer sets the dimensions of the receiving part of the hydrophone and the position of the acoustic center according to the drawing of the receiving part and, thereby, replaces the acoustic parameters with geometric ones. To restore the consistency of the characteristics, it is proposed to determine the position of the acoustic center and the equivalent size of the receiving part of the hydrophone from the results of acoustic measurements. It is shown that the displacement of the acoustic center of a hydrophone relative to its geometric center is a characteristic phenomenon, while the geometric and acoustically measured dimensions of the active element may differ. To ensure the unity of acoustic measurements, it is proposed to introduce the concept of an equivalent radius and to clarify the concept of the acoustic center of a hydrophone, as well as to standardize the methods of their experimental determination. The results obtained will be useful in monitoring the phase responses of elements of hydroacoustic antennas for various purposes, ensuring the identity of the phase-frequency characteristics of the vector receivers measuring channels, in solving problems related to restoring the shape of an acoustic signal from the recorded output receiver voltage, for various applications, including marine ecology, medical ultrasound, etc.

Keywords: hydrophone, amplitude-phase hydrophone calibration, reciprocity method, hydrophone acoustic center, active element equivalent radius

Введение. При калибровке и эксплуатации гидрофона используется сложившийся набор его характеристик. К характеристикам гидрофона относятся размеры приёмной части и положение акустического центра (АЦ), которые производитель определяет по чертежу приёмной части, тем самым подменяя акустические параметры геометрическими. Пока основной метрологической характеристикой гидрофона было значение модуля чувствительности на частоте звуковой волны при её падении с опорного направления, применение полученных по чертежу (как указано выше) характеристик позволяло с необходимой точностью выравнять преобразователи на одном горизонте при калибровке, проверять выполнение закона обратной пропорциональности звукового давления расстоянию, определять модуль чувствительности и характеристики направленности. Необходимость использования, взаимообусловленность и согласованность характеристик гидрофона в наибольшей степени проявляется при его калибровке по полю. Положение АЦ требуется знать, чтобы установить преобразователи в бассейне и выровнять их на одном горизонте, а габаритные размеры приёмной части – для определения расстояния между излучателем и приёмником акустическим способом с учётом поправки на радиусы. При измерениях характеристики направленности (угловой зависимости модуля чувствительности) гидрофон поворачивают вокруг оси его симметрии.

По мере расширения круга задач гидроакустических измерений потребовалось определять фазочастотную характеристику (ФЧХ) гидрофона с целью контроля фазовых характеристик элементов гидроакустических антенн различного назначения [1, 2], обеспечения идентичности ФЧХ измерительных каналов приёмников векторных гидроакустических величин [3], восстановления формы акустического сигнала по напряжению, зарегистрированному на выходе приёмника, а также для различных приложений (экология моря, медицинский ультразвук и др.) [4–7].

Включение ФЧХ в набор нормируемых характеристик гидрофона влечёт за собой необходимость не только уточнить смысловую нагрузку традиционно используемых характеристик, но и, возможно, расширить этот набор. Для измерения аргумента комплексной чувствительности и фазовой характеристики направленности потребовалось повысить точность определения координат АЦ. В силу взаимообусловленности характеристик повышение требований к точности определения координат АЦ нарушило согласованность и сложившийся порядок использования характеристик гидрофона при его калибровке, например, стали вращать гидрофон относительно оси, проходящей через АЦ, а не оси симметрии гидрофона. Для точной локализации АЦ необходимо разрабатывать новые способы определения его координат.

Применяемый ранее акустический способ давал настолько низкую точность определения положения АЦ, что предпочтительнее было использовать назначенное производителем положение АЦ. Однако назначенное положение

АЦ во многих случаях оказалось непригодным для определения ФЧХ гидрофона. Чтобы восстановить согласованность характеристик гидрофона, положение АЦ определяли по результатам не геометрических, а акустических измерений. Попытка разработать способы уточнения положения АЦ привели к появлению нового понятия – акустического размера приёмной части гидрофона.

По комплексным значениям электрических передаточных импедансов пар «излучатель – приёмник» можно вычислить комплексную чувствительность приёмника по формуле метода взаимности. Однако результат вычислений зависит от того, какой акустический смысл был вложен в исходные измерения. Например, к неприемлемо большим погрешностям определения аргумента чувствительности может привести использование при вычислениях положения геометрического центра (ГЦ) активного элемента преобразователя вместо его АЦ. Оказалось, что подобные упрощения, приемлемые при измерениях модуля, недопустимы при измерениях аргумента чувствительности. Ситуация усугубляется в измерительных случаях, когда перестают работать и акустические понятия, например, замена гидрофона на его АЦ. В расчёты при измерениях методом взаимности входит расстояние между АЦ. Казалось бы, оно равно расстоянию, которое пробегает звуковая волна при распространении от излучателя к приёмнику. Это расстояние можно получить, излучив короткий импульс и измерив временную задержку между моментами начала излучения и приёма. Однако начало приёма сигнала гидрофоном опережает по времени приход звуковой волны в точку расположения его АЦ. Поэтому измеряется расстояние, пройденное фронтом звуковой волны, но не расстояние, которое следует использовать при калибровке по полю методом взаимности. В методе взаимности применяется понятие сферической волны, волновая поверхность которой – сфера радиусом r , а изменение звукового давления пропорционально $1/r$.

Для реальных излучателя и приёмника, которые не являются математическими точками, а имеют размер, фронт волны (граничная поверхность, разделяющая возмущённую и невозмущённую среды) и волновая поверхность – не одно и то же. Добавив к расстоянию, пройденному фронтом, значения радиусов активных элементов излучателя и приёмника, получим расстояние, которое можно использовать в расчётах при методе взаимности. Это расстояние и принимают в качестве расстояния между АЦ [8]. Таким образом, вновь упрощая акустическую модель, используют радиус – понятие геометрическое, и вновь совершают подмену, принимая одно в качестве другого.

Такие подмены приводят к тому, что при амплитудно-фазовой калибровке гидрофона методом взаимности, стандартизованной в последней версии ИЕС 60565-1(2020)¹, погрешность аргумента чувствительности предложено уменьшать, размещая преобразователи по схеме Люкера-Ван Бюрена [9]. Однако этот приём полностью проблему не решает. На практике применяют прецизионные 3D-системы позиционирования

¹ ИЕС 60565-1(2020). Подводная акустика. Гидрофоны. Калибровка гидрофонов. Часть 1. Процедуры калибровки гидрофонов в свободном поле.

калибруемого приёмника по ГЦ его активного элемента [5], используют поправки на смещение АЦ при развороте приёмника при его калибровке [10], получают ФЧХ приёмника по относительной амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) с применением преобразования Гильберта [11]. Однако, несмотря на принимаемые меры, результаты измерений модуля и измерений аргумента чувствительности остаются далеко не равноточными. Стандартизованный в IEC 60565-1 (2020) метод калибровки и его модификация с участием прецизионной системы юстировки ГЦ по лучу лазера – это подмена АЦ на ГЦ со всеми вытекающими последствиями.

Цель настоящей работы – уточнение и дополнение набора нормируемых характеристик гидрофонов для обеспечения требуемой точности акустических измерений при решении расширенного круга измерительных задач.

Положение акустического центра измерительного гидрофона. В [12] предложен способ определения положения АЦ измерительного гидрофона, измерительный эксперимент описан в [13]. По итогам исследований гидрофонов различных типов указанным способом установлено, что смещение АЦ гидрофона относительно его ГЦ – характерное явление. В таблице приведены параметры гидрофонов ГИ-20, ГИ 20 (в данном случае гидрофоны ГИ 20 и ГИ-20 рассматриваются как разные гидрофоны, так как имеют разную толщину покрытия, т. е. разные диаметры контура активного элемента) ГИ 21, ОП-1 (ВНИИФТРИ, Россия) и ТС4034 (Teledyne RESON A/S, Дания): диаметры активного элемента D и его контура d , а также смещение Δ (расстояние до ГЦ с учётом суммарной неопределённости результата измерения смещения АЦ гидрофона относительно ГЦ) и угол α_0 (направление смещения относительно опорного направления гидрофона).

Среднее смещение АЦ для гидрофонов всех типов составляет примерно 0,5 мм (около 20 % средней толщины покрытия гидрофонов). Измерив задержку фронта принятой гидрофоном звуковой волны, удалось определить смещение с погрешностью 12–15 %.

К источникам неопределённости экспериментального определения координат АЦ относятся:

неопределённость измерения временных задержек импульсов излучателя (длины пути пробега звуковой волны), принятых гидрофоном при изменении угла падения звуковой волны;

неопределённость фиксации ГЦ гидрофона в опорном направлении излучателя;

сдвиг ГЦ гидрофона в направлении, перпендикулярном опорному направлению излучателя;

влияние вибрации.

Параметры гидрофонов

Гидрофон	D , мм	d , мм	Δ , мкм	α_0 , °
ГИ 20	20	23	664±71	99
ОП-1	40	44	252±45	299
ГИ-20	20	27	710±89	210
ГИ 21	10	13	452±52	285
ТС4034	6	11	288±38	137

В эксперименте, описанном в [13], по последовательно излучённым и принятым гидрофоном косинусным и синусным тональным импульсам строили аналитические сигналы. После квадратурной обработки сигналов получали огибающие – временные зависимости модуля и фазы аналитических сигналов [12]. Малые смещения оси вращения гидрофона обеспечивали прецизионной 3D-системой позиционирования, контролируя положение оси по лучу лазера с помощью фотокамеры и фотодетектора. Применение малошумящего усилителя в сочетании с когерентным накоплением принятых гидрофоном сигналов позволило значительно увеличить отношение сигнал/шум осциллограмм, которые использовали для дальнейшей обработки. Для повышения точности определяли не задержки во времени принятых гидрофоном импульсов излучателя, а зависимость изменения этой задержки от угла падения звуковой волны [12], используя характерный участок в начальной части фронта огибающих. Частота дискретизации сигнала аналого-цифровым преобразователем составляла 500 МГц, что даёт оценку границы неопределённости измерения пути пробега звуковой волны не более 3 мкм. В качестве оценки неопределённости фиксации оси вращения гидрофона принимали минимальный шаг перемещения 3D-системы позиционирования 12 мкм.

Разрешение матрицы фотокамеры, её удалённость от гидрофона и кратность увеличения объектива были такими, что размер одного пикселя изображения в опорном направлении излучателя соответствовал 22 мкм. Положения контура гидрофона до и после его поворота выравняли с погрешностью 1 пиксел изображения.

Смещение ГЦ в направлении, перпендикулярном опорному направлению излучателя, контролировали с помощью лазерного луча и фотодетектора. Установили, что неопределённостью, вызванной этим смещением, можно пренебречь.

В экспериментах значение стандартной неопределённости типа А достигало 15 % измеренного значения смещения. Возможная причина – вибрация в лабораторном помещении. Неопределённость типа В составила 25 мкм. Значения суммарной неопределённости результата измерения смещения АЦ гидрофона относительно ГЦ приведены в таблице.

Эквивалентный радиус активного элемента. В [14] при калибровке ультразвуковых гидрофонов с использованием сфокусированного ультразвукового луча установлено различие геометрических (номинальных) и измеренных акустически размеров активных элементов гидрофонов. Влияние на результат калибровки пространственного усреднения звукового давления на активном элементе гидрофона оценивали количественно как по геометрическим, так и по измеренным акустически размерам элемента. В результате исследования ряда гидрофонов авторы [14] обнаружили, что разница между геометрическим и акустическим размером активного элемента гидрофона может оказаться настолько большой, что для таких оценок можно использовать только акустический размер.

Чтобы получить ФЧХ расчётным методом требуется знать радиус активного элемента приёмника. Однако неясно, что понимать под радиусом, чтобы, добавив к минимально-фазовой части ФЧХ (МФЧХ) фазовый набег на этом

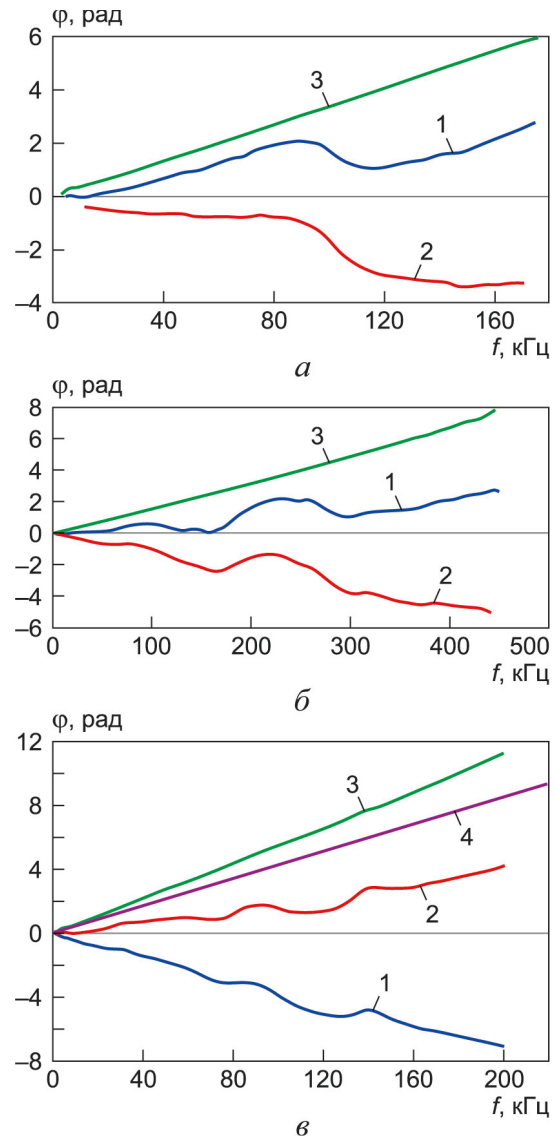
радиусе, получить ФЧХ гидрофона [9, 11, 15, 16]. Результаты экспериментов, выполненных на Государственном первичном эталоне единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде ГЭТ 55-2017 [12, 13], дают основание полагать, что геометрический и измеренный акустически размеры активного элемента могут различаться не только для ультразвуковых гидрофонов.

На рисунках *а, б* приведены следующие характеристики гидрофонов TC4033 (Teledyne RESON A/S, Дания) и B&K8103 (Brüel&Kjaer, Дания): ФЧХ (1), полученные по стандартизованной измерительной процедуре комплексной калибровки методом взаимности, дополненной введением поправки на смещение АЦ при развороте калибруемого гидрофона; МФЧХ (2), рассчитанные с использованием преобразования Гильберта относительной АЧХ гидрофона; разности ФЧХ и МФЧХ (3), которые практически совпадают с аппроксимирующими их наклонными пунктирными прямыми.

Согласно предложенной в [11] модели гидрофона частотные зависимости 3 звена опережения представляют собой фазовый набег kr звуковой волны при её распространении на расстояние, равное радиусу r активного элемента гидрофона (k – волновое число). Как и следовало ожидать, аппроксимирующие прямые проходят через начало координат. Исходя из наклонов прямых радиусы активных элементов гидрофонов должны составлять 3,73 и 7,93 мм для гидрофонов B&K8103 и TC4033 соответственно. Однако эти данные не соответствуют радиусам 4,75 мм и 12,5 мм, указанным производителями гидрофонов в технических описаниях. Информация о размерах собственно активного элемента, скрытого непрозрачным влагонепроницаемым покрытием, либо о толщине его покрытия в технических описаниях отсутствует.

Гидрофон ГИ-20 имеет пьезокерамический активный элемент диаметром 20 мм, состоящий из двух полусфер или из цельной сферы. Толщина слоя влагонепроницаемого покрытия составляет 2 и 4 мм для цельной и сборной сфер соответственно. На рисунке *в*, помимо экспериментальной ФЧХ (1), расчётной МФЧХ (2) и разности ФЧХ и МФЧХ (3), приведена зависимость kr (4), рассчитанная для указанного в документации гидрофона ГИ-20 значения радиуса пьезокерамической сферы $r=10$ мм. Зависимость 4, наклону которой соответствует значение радиуса $r=12,6$ мм, существенно отличается от зависимости 3. Это различие может быть вызвано разной толщиной покрытия и стенок активного элемента, различием скоростей распространения звука в материалах покрытия и активного элемента и их отличием от скорости звука в среде, окружающей преобразователь, и пр. При калибровке по фазе к точности числа, подставляемого в формулу измерений в качестве размера активного элемента, предъявляют повышенные требования, поэтому целесообразно понимать этот размер не в геометрическом смысле, а как некий эквивалентный размер, который необходимо определять акустическим способом.

Предложенный в [12] способ определения эквивалентного радиуса активного элемента гидрофона основан на использовании временной задержки $\tilde{\tau}_{P-H}$ сигнала приёмника



Фазочастотные характеристики гидрофонов TC4033 ($r=7,93$ мм), B&K8103 ($r=3,73$ мм), ГИ-20 ($r=12,6$ мм) – *а–в* соответственно; 1 – фазочастотная характеристика; 2 – минимально-фазовая часть фазочастотной характеристики; 3 – разность характеристик 1, 2; 4 – фазовый набег звуковой волны при распространении на расстояние 10 мм, равное радиусу r активного элемента гидрофона

Phase-frequency responses of hydrophones TC4033 ($r=7.93$ mm), B&K8103 ($r=3.73$ mm), GI-20 ($r=12.6$ mm) – *a–c*, respectively; 1 – phase-frequency response; 2 – minimum-phase part of the phase-frequency response; 3 – difference of responses 1, 2; 4 – phase incursion of a sound wave when propagating over a distance $r=10$ mm; r – is the radius of the hydrophone active element

относительно начала излучения и координат АЦ излучателя P и приёмника H для определения расстояния r_{P-H} между ними. Время распространения звуковой волны на расстояние между точками расположения АЦ преобразователей $\tau_{P-H}=r_{P-H}/c$, где c – скорость звука. Тогда разность $\Delta\tilde{\tau}_{P-H}=\tilde{\tau}_{P-H}-\tau_{P-H}$ – время пробега звуковой волны на расстояние, равное сумме расстояний $\tilde{r}_P, \tilde{r}_H$, под которыми понимают эквивалентные радиусы активных элементов

излучателя и приёмника соответственно [12]. Для времён $\tilde{r}_P = \tilde{r}_P/c$, $\tilde{r}_H = \tilde{r}_H/c$ пробега звуковой волной расстояний $\tilde{r}_P$, $\tilde{r}_H$ соответственно выполняется равенство $\Delta\tilde{r}_{P-H} = \tilde{r}_P + \tilde{r}_H$.

Если для трёх пар «излучатель P – гидрофон H », «излучатель P – обратимый преобразователь T » и «обратимый преобразователь T – гидрофон H » определены равенства $\Delta\tilde{r}_{P-H} = \tilde{r}_P + \tilde{r}_H$, $\Delta\tilde{r}_{P-T} = \tilde{r}_P + \tilde{r}_T$ и $\Delta\tilde{r}_{T-H} = \tilde{r}_T + \tilde{r}_H$, то этих данных достаточно для вычисления значений эквивалентных радиусов всех трёх преобразователей:

$$\tilde{r}_P = c\tilde{r}_P = c(\Delta\tilde{r}_{P-T} - \Delta\tilde{r}_{T-H} + \Delta\tilde{r}_{P-H})/2;$$

$$\tilde{r}_T = c\tilde{r}_T = c(\Delta\tilde{r}_{T-H} - \Delta\tilde{r}_{P-H} + \Delta\tilde{r}_{P-T})/2;$$

$$\tilde{r}_H = c\tilde{r}_H = c(\Delta\tilde{r}_{P-H} - \Delta\tilde{r}_{P-T} + \Delta\tilde{r}_{T-H})/2.$$

Для участвовавшего в эксперименте гидрофона ГИ-20 значение эквивалентного радиуса составило 12,1 мм, что значительно лучше согласуется с результатами, представленными на рисунке 6.

Заключение. Существенный разброс результатов определения положения АЦ, обусловленный вибрацией при эксперименте, не позволяет рассматривать представленные данные как окончательное значение эквивалентного радиуса гидрофона типа ГИ-20, но указывает на проблему, которая заключается в необходимости определять положения АЦ и эквивалентные радиусы преобразователей, участвующих в измерениях ФЧХ гидрофонов при калибровке методом взаимности. ФЧХ можно измерять различными способами, например классическим, измеряя модули и аргументы комплексных передаточных импедансов пар «излучатель – приёмник», либо используя модель гидрофона в виде минимально-фазовой системы и звена опережения, и др. В любом случае обозначенная проблема требует решения. В воздушной акустике малый разброс значений дифракционных поправок позволяет применять одни и те же дифракционные поправки для микрофонов одного типа. В настоящее время очевидно, что использовать для гидрофонов типовые координаты АЦ невозможно, а возможность применения типовых значений эквивалентных радиусов ещё предстоит установить. Для этого необходимо уменьшить неопределённость типа А результатов измерений и набирать статистику по гидрофонам различных типов.

Немедленный практический результат, подобно ситуации с микрофонами, появляется для гидрофонов, ФЧХ которых можно определять на установках для измерения АЧХ (с учётом типовых значений эквивалентных радиусов). Ещё одно практическое следствие – появление нового параметра, характеризующего качество гидрофонов, – малый разброс эквивалентных радиусов отдельных экземпляров. Для таких гидрофонов упрощается процедура передачи единицы по поверочной схеме, для этого достаточно передать только подробную АЧХ. Другое следствие – требование высокой точности совмещения АЦ и ГЦ, по крайней мере, для эталонных гидрофонов.

Близость АЦ и ГЦ и малый разброс эквивалентных радиусов – параметры задаваемые и проверяемые, что позволяет

использовать их в процессах совершенствования как конструкции гидрофонов, так и технологии их изготовления. Знание этих параметров гидрофонов повышает их конкурентоспособность.

Метрологический результат экспериментов – возможность совершенствовать ГЭТ 55-2017, опираясь на два метода измерения ФЧХ с существенно независимыми источниками погрешностей. Возможность пересчёта АЧХ в ФЧХ и наоборот позволяет контролировать качество измерительного эксперимента, которое зависит не только от эталонной установки, но и от калибруемого гидрофона. Благодаря этой возможности в рамках Международных пилотных сличений KOOMET 786 RU/19 при нестабильности опорного гидрофона удалось подтвердить правильность применённых участниками сличений методик измерений и стабильность работы эталонных установок.

Допуски на размеры микрофонов составляют сотые доли миллиметра. Высказанное теоретически оправданное предложение – вращать гидрофон относительно АЦ – практически невыполнимо на существующих эталонах. Более рациональным представляется дополнить требования к характеристикам гидрофона новым требованием: АЦ должен располагаться на оси симметрии гидрофона. Причём точность изготовления гидрофона должна быть доведена до точности изготовления микрофонов. Для гидрофона, предназначенного для фазовых измерений, положение АЦ должно быть измерено акустическим способом с высокой точностью, а к его характеристикам должна добавиться новая – акустический размер или эквивалентный радиус активного элемента гидрофона.

С целью обеспечения единства акустических измерений в стандарте на калибровку гидрофона представляется целесообразным уточнить формулировки понятий АЦ и эквивалентного радиуса, отсутствующие в IEC 60565-1(2020), а также стандартизовать способы их экспериментальных измерений.

Список источников

1. Базулин Е. Г., Соколов Д. М. Восстановление ультразвуковых изображений отражателей по неполным данным методом распознавания со сжатием // Акустический журнал. 2019. Т. 65. № 4. С. 520–532. <https://doi.org/10.1134/S0320791919040038>
2. Росницкий П. Б., Сапожников О. А., Гаврилов Л. Р., Хохлова В. А. Метод создания абсолютно плотных фазированных решеток для неинвазивной ультразвуковой хирургии с контролем степени нерегулярности расположения элементов // Акустический журнал. 2020. Т. 66. № 4. С. 366–376. <https://doi.org/10.31857/S0320791920040097>
3. Кузнецов Г. Н., Пудовкин А. А., Субботкин А. О. Уравнения для расчета амплитудно- и фазочастотных характеристик векторно-скалярного приемника типа «триполь» с временной задержкой сигнала монополя // Акустический журнал. 2021. Т. 67. № 4. С. 440–449. <https://doi.org/10.31857/S0320791921040080>
4. Cooling M. P., Humphrey V. F., *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2008, vol. 55, pp. 84–93. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2008.619>

5. Hayman G., Robinson S. P., *Phase calibration of hydrophones by the free-field reciprocity method in the frequency range 10 kHz to 400 kHz*, NPL Report AC1, 2007, pp. 1–23, URL: <http://eprintspublications.npl.co.uk/id/eprint/3981> (дата обращения: 08.12.2022).
6. Umchid S., Gopinath R., Srinivasan K., et al., *Ultrasonics*, 49, 306–311 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2008.09.011>
7. Harris G. R., *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2011, vol. 58(11), pp. 2325–2333. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2011.2090>
8. Исаев А. Е. Точная градуировка приёмников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2008. 369 с.
9. Luker L. D., Van Buren A. L., *J. Acoust. Soc. Am.*, 1981, vol. 70, pp. 516–519. <https://doi.org/10.1121/1.386715>
10. Исаев А. Е., Матвеев А. Н., Поликарпов А. М., Щерблюк Н. Г. Измерение фазочастотной характеристики чувствительности гидрофона по полю методом взаимности // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 56–59.
11. Исаев А. Е., Хатамтаев Б. И. Определение фазочастотной характеристики гидрофона по амплитудно-частотной характеристике // Измерительная техника. 2021. № 7. С. 48–53. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-7-48-53>
12. Исаев А. Е., Поликарпов А. М., Хатамтаев Б. И. Экспериментальное определение акустического центра измерительного гидрофона // Альманах современной метрологии. 2022. № 2(30). С. 56–71.
13. Хатамтаев Б. И., Щерблюк Н. Г. Акустический центр измерительного гидрофона и его экспериментальное определение // Измерительная Техника. 2022. № 10. С. 53–57. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-53-57>
14. Masahiro Yoshioka, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(5):3926–3928. <https://doi.org/10.1143/JJAP.47.3926>
15. Исаев А. Е., Хатамтаев Б. И. Аналитическое представление комплексной частотной характеристики гидрофона // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 16–20. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-16-20>
16. Jacobsen F., Barrera-Figueroa S., Rasmussen K., *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, vol. 115, pp. 1468–1473. <https://doi.org/10.1121/1.1652036>
2. Rosnitskii P. B., Sapozhnikov O. A., Gavrilov L. R., Khokhlova V. A., *Acoustical Physics*, 2020, vol. 66, no. 4, pp. 366–376. <https://doi.org/10.1134/S1063771020040090>
3. Kuznetsov G. N., Pudovkin A. A., Subbotkin A. O., *Acoustical Physics*, 2021, vol. 67, no 4, pp. 421–429. <https://doi.org/10.1134/s1063771021040084>
4. Cooling M. P., Humphrey V. F., *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2008, vol. 55, pp. 84–93. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2008.619>
5. Hayman G., Robinson S. P., *Phase calibration of hydrophones by the free-field reciprocity method in the frequency range 10 kHz to 400 kHz*, NPL Report AC1, 2007, pp. 1–23, available at: <http://eprintspublications.npl.co.uk/id/eprint/3981> (accessed: 08.12.2022).
6. Umchid S., Gopinath R., Srinivasan K., et al., *Ultrasonics*, 49, 306–311 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2008.09.011>
7. Harris G. R., *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2011, vol. 58(11), pp. 2325–2333. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2011.2090>
8. Isaev A. E., *Tochnaja gradiurovka priemnikov zvukovogo davleniya v vodnoj srede v usloviyah svobodnogo polja*, Mendeleev, VNIIFTRI Publ., 2008, 369 p. (In Russ.)
9. Luker L. D., Van Buren A. L., *J. Acoust. Soc. Am.*, 1981, vol. 70, pp. 516–519. <https://doi.org/10.1121/1.386715>
10. Isaev A. E., Matveev A. N., Polikarpov A. M., Shcherblyuk N. G., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 706–711. <https://doi.org/10.1007/S11018-013-0269-Z>
11. Isaev A. E., Khatamtaev B. I., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 7, pp. 580–585. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-7-48-53>
12. Isaev A. E., Polikarpov A. M., Khatamtaev B. I., Experimental determination of the acoustic center of a measuring hydrophone, *Al'manac of modern metrology*, 2022, no. 2(30), pp. 56–71. (In Russ.)
13. Khatamtaev B. I., Shcherblyuk N. G., *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2022, no. 10, pp. 53–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-53-57>
14. Masahiro Yoshioka, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(5):3926–3928. <https://doi.org/10.1143/JJAP.47.3926>
15. Isaev A. E., Khatamtaev B. I., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 8, pp. 622–627. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01981-7>
16. Jacobsen F., Barrera-Figueroa S., Rasmussen K., *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, vol. 115, pp. 1468–1473. <https://doi.org/10.1121/1.1652036>

References

Статья поступила в редакцию 17.11.2022; одобрена после рецензирования 21.11.2022; принята к публикации 24.11.2022.
The article was submitted 17.11.2022; approved after reviewing 21.11.2022; accepted for publication 24.11.2022.

Синтез мер размера частиц на основе водных суспензий полистирольных латексных сфер

Дмитрий Вадимович Аверкин^{1,2}

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл., Россия, averkin@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8653-3267>

² Тверской государственный университет, Тверь, Россия

Аннотация. Проведена комплексная разработка способа получения мер размера частиц на основе водных суспензий полистирольных латексных сфер. Для синтеза суспензий предложен метод затравочной эмульсионной полимеризации стирола в условиях избытка дисперсионной среды. В работе использовано оборудование из состава Государственного первичного эталона единиц дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов ГЭТ 163-2020. Гранулометрический состав синтезированных в работе образцов суспензий исследован методами динамического рассеяния света и дифракции лазерного излучения. Изучены метрологические характеристики синтезированных суспензий. Установлено, что в зависимости от способов эмульсионной полимеризации и микроэмульгирования стирола можно получить моодисперсные микросферы полистирольного латекса различного диаметра. Исследовано влияние количества вносимого поверхностно-активного вещества на процесс квазиспонтанного микроэмульгирования мономера при затравочной полимеризации. По итогам исследований в качестве мер размера частиц предложены водные суспензии моодисперсных полистирольных латексных сфер с медианным значением диаметра частиц 0,31 и 0,54 мкм. Результаты исследований можно применять при получении моодисперсных частиц размерами более 1 мкм методом затравочной полимеризации.

Ключевые слова: частица, полистирольные латексы, микроэмульсия, суспензия, мера, эмульсионная полимеризация, коллоидная частица

Для цитирования: Аверкин Д. В. Синтез мер размера частиц на основе водных суспензий полистирольных латексных сфер // Измерительная техника. 2022. № 12. С. 64–68. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-64-68>

Synthesis of standard reference materials of particle size in liquid medium based on aqueous suspensions of polystyrene latex spheres

Dmitry V. Averkin^{1,2}

¹ Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow Region, Russia, averkin@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8653-3267>

²Tver State University, Tver, Russia

Abstract. Comprehensive work has been carried out to develop a method for obtaining particle size standard reference materials based on aqueous suspensions of polystyrene latex spheres. For the synthesis of suspensions, a method of seed emulsion polymerization of styrene under conditions of excess dispersion medium is proposed. The equipment from the State Primary Standard of units of dispersed parameters of aerosols, suspensions and powdery materials was used in the work. The granulometric composition of the suspension samples synthesized in the work was investigated by the methods of dynamic light scattering and diffraction of laser radiation. Metrological characteristics of synthesized suspensions have been studied. It is established that, depending on the methods of emulsion polymerization and microemulsification of styrene, monodisperse microspheres of polystyrene latex of various diameters can be obtained. The effect of the amount of the introduced surfactant on the process of quasi-spontaneous microemulsification of the monomer during seed polymerization is investigated. According to the results of the research, aqueous suspensions of monodisperse polystyrene latex spheres with a median particle diameter of 0.31 microns and 0.54 microns were proposed as measures of particle size. The results of the research can be used to obtain monodisperse particles larger than 1 microns by seed polymerization.

Keywords: particle, polystyrene latexes, microemulsion, suspension, standard reference material, emulsion polymerization, colloidal particle

Введение. Моодисперсные частицы латексов – водная дисперсия однородных сферических частиц с узким распределением по размерам – предназначены для калибровки

аэрозольных и гидрозольных счётчиков, определения размеров пор ядерных фильтров, получения дисперсий с известным числом частиц, проверки анализаторов размера

частиц. Монодисперсные частицы латексов возможно использовать в качестве мер для воспроизведения значений дзета-потенциала и электрофоретической подвижности частиц в дисперсных системах, однако существуют сложности как в достижении необходимого значения поверхностного заряда на частице, так и в получении набора образцов в диапазоне значений ± 150 мВ [1]. В настоящее время применяют различные способы получения монодисперсных латексных сфер (частиц). Наиболее распространён способ эмульсионной полимеризации в среде с нерастворимым стиролом. В роли среды обычно выступает бидистиллированная и деионизованная вода, а в роли эмульгатора и стабилизатора полистирольных частиц – соли малорастворимых в воде карбоновых кислот – лауриновой, стеариновой, миристиновой, бегеновой [2, 3]. Также можно применять прочие малорастворимые в воде поверхностно-активные вещества (ПАВ) [4–6]. Второй способ – дисперсионная полимеризация стирола в присутствии стабилизаторов в виде различных полимеров – поливинилпирролидона, полиметилметакрилата, полиакриловой кислоты [7–10]. Указанные способы позволяют одностадийным способом получить полистирольные латексные сферы размерами менее 5 мкм. Более крупные монодисперсные латексные сферы традиционно получают эмульсионной полимеризацией путём инициирования полимеризации на поверхности готовых монодисперсных латексных сфер [6, 11, 12]. Также можно использовать со-мономер дивинилбензола для увеличения молекулярной массы частиц латексов в методе дисперсионной полимеризации [13].

Особенностью рассматриваемого в настоящей работе метода эмульсионной полимеризации путём инициирования полимеризации на поверхности готовых монодисперсных латексных сфер является точное определение массовых соотношений мономер/ПАВ как для исходной эмульсии, используемой для наращивания, так и для процесса роста частиц. Необходимо рассчитать и ввести в эмульсию такое количество ПАВ, чтобы оно, во-первых, было значительно ниже критической концентрации мицеллообразования в водной среде, а во-вторых, чтобы его количества было достаточно для образования стабильного межфазного адсорбционного слоя на поверхности частиц [3, 12]. В случае избытка ПАВ в водной среде происходит параллельная полимеризация стирола с образованием мелких частиц из смеси мономер-ПАВ за счёт образования стабильной микроэмульсии мономера, в случае недостатка – избыточное образование коагулята и образование агрегатов. Оба этих процесса приводят к увеличению степени полидисперсности готовой суспензии.

Цель настоящей работы – разработать технологию синтеза мер размера частиц на основе водных суспензий монодисперсных полистирольных латексных сфер. Для достижения поставленной цели необходимо исследовать условия полимеризации частиц латекса в условиях избытка водной фазы и процесс полимеризации стирола на поверхности

готовых латексных сфер. Для определения метрологических характеристик и дисперсных свойств полученных образцов суспензий использованы методы динамического рассеяния света и дифракции лазерного излучения.

Методы определения дисперсных свойств частиц.

Наиболее распространёнными методами определения дисперсных свойств (методов определения размеров частиц) в процессе синтеза латексных сфер являются динамическое рассеяние света (ДРС) и, в зависимости от необходимого разрешения, просвечивающая или сканирующая электронная микроскопия. Процедура пробоподготовки монодисперсных латексных сфер описана в ГОСТ Р 8.774-2011¹. Суть метода ДРС заключается в зондировании взвеси лазерным лучом, при этом часть излучения рассеивается на локальных пространственных флуктуациях показателя преломления суспензии, вызванных броуновским движением частиц. Интенсивность $I(f)$ рассеянного света пропорциональна спектральной плотности мощности этих флуктуаций. Гидродинамический диаметр d частиц рассчитывают по формуле Стокса-Эйнштейна

$$d = kT / (3\pi\eta D),$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура; η – вязкость; D – коэффициент диффузии.

Ввиду особенностей пробоподготовки образцов для методов микроскопии и математической модели расчёта корреляционной функции в ДРС эти методы не являются репрезентативными в случае контроля реакционной смеси на микроэмульгированный стирол. Также ДРС нельзя применять, если частицы взвеси имеют близкие коэффициенты диффузии. В таком случае при большей интенсивности рассеяния фракции частиц с большим коэффициентом диффузии дают больший вклад в интенсивность рассеяния, чем вызывают сдвиг функции распределения по размерам в сторону меньших размеров, и наоборот. При относительно равной интенсивности рассеяния частиц разных фракций наблюдается широкое полидисперсное распределение по размерам.

В отличие от ДРС, в методе дифракции лазерного излучения (ДЛИ) измеряют интенсивности углового рассеяния плоской монохроматической электромагнитной волны на частицах суспензии или эмульсии, т. е. наиболее близкие по размерам частицы можно разделить, а также определить в суспензии эмульгированный стирол. На основе индикатрисы рассеяния, регистрируемой многоэлементным фотоприёмным устройством, при решении обратной задачи рассеяния для моделей частиц сферической формы определяют средний размер частиц. За счёт разницы плотностей стирола ($0,909$ г/см³), полистирольных сфер ($1,05$ г/см³) и воды (1 г/см³) стирол флотирует к поверхности образца, поэтому его нельзя детектировать методом ДРС в луче лазера, однако с использованием ДЛИ детектируются как полистирольные сферы, так и стирол из-за циркуляции образца в закрытой кювете.

¹ ГОСТ Р 8.774-2011. Дисперсный состав жидких сред. Определение размеров частиц по динамическому рассеянию света.

Экспериментальные исследования. Для достижения поставленной цели синтезированы образцы моодисперсных латексных сфер размерами 0,31 и 0,54 мкм, описаны условия синтеза образцов и исследованы их метрологические характеристики.

Для приготовления исходных микроэмульсий стирола в воде использовали очищенный от стабилизатора и перегнанный под вакуумом при 50 °С стирол (99 %). Для приготовления ПАВ – лаурата калия – применяли лауриновую кислоту (99 %) и гидроксид калия (чистый для анализа). Инициатором служил водный раствор персульфата калия (99+ %). В работе использовали деионизированную воду.

Перед полимеризацией навеску лауриновой кислоты растворяли в перегнанном стироле, щёлочь и персульфат калия растворяли в воде. Водный раствор щёлочи и инициатора термостатировали при активном перемешивании в атмосфере аргона до стабилизации температуры термостата реактора при необходимой реакционной температуре с погрешностью 0,1 °С. При достижении необходимой реакционной температуры в реактор вводили стирол с растворённой навеской лауриновой кислоты и продолжали термостатирование при перемешивании. Для наращивания латексных сфер использовали чистый стирол без лауриновой кислоты.

Электронные спектры образцов в кварцевых кюветах толщиной 1 мм регистрировали при комнатной температуре в ультрафиолетовом и видимом диапазонах на длинах волн $\lambda = 190 \dots 1100$ нм спектрофотометром СФ-56 (ОКБ «Спектр», Россия). Предварительно 20 мкл образца разбавляли в 1000 мкл деионизированной воды и перемешивали. При построении кинетической кривой учитывали показатель пропускания T при $\lambda = 300$ нм для каждого образца с момента введения стирола в систему и начала полимеризации до её окончания с различным временным шагом. Окончание полимеризации определяли по двум последовательным измерениям с равным временным шагом, в которых не изменялся показатель пропускания T . Гранулометрический состав образцов измеряли анализаторами Mastersizer 2000 и Zetasizer NanoZS (Malvern Instruments Ltd., Великобритания) из состава Государственного первичного эталона единиц дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов ГЭТ 163-2020.

Результаты измерений синтезированных мер размера частиц

n_o	Метод	d , мкм	S , %
1	ДРС	0,24	3,3
	ДЛИ	0,25	1,9
2	ДРС	0,29	5,1
	ДЛИ	0,31	2,4
3	ДРС	0,16 и 0,53	5,6
	ДЛИ	0,18 и 0,55	5,8
4	ДРС	0,33	6,0
	ДЛИ	0,31	3,2
5	ДРС	0,52	3,8
	ДЛИ	0,54	1,8

Для синтезированных образцов по измеренным медианным значениям рассчитали относительные средние квадратические отклонения (СКО) S размеров частиц по формуле

$$S = \bar{x}^{-1} \sqrt{(n-1)^{-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot 100,$$

где x_i – i -е измеренное значение размера частиц; $\bar{x}$ – среднее арифметическое из n измеренных значений или показаний.

Результаты измерений (средние значения по результатам 10 измерений) синтезированных образцов – мер размера частиц двумя методами приведены в таблице, где n_o – номер образца.

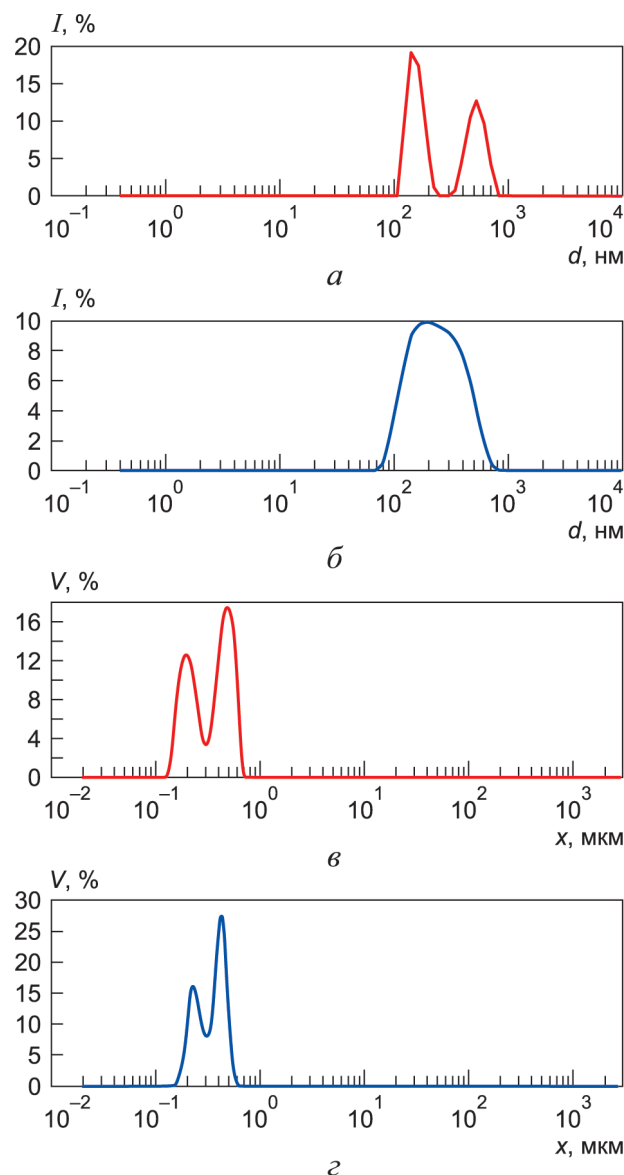


Рис. 1. Размеры частиц латексов в образцах 3 (а, в), 5 (б, г), измеренные методами ДРС (а, б) и ДЛИ (в, г); V – объемная концентрация частиц в образце

Fig. 1. Measured value of latex particle size in the sample 3 (a, c), 5 (b, d) by DLS (a, b) and SLS (c, d) methods; V – volume concentration of measured particles

Результаты и их обсуждение. Исследовали влияние процесса образования микроэмульсии, способов введения стирола в объём реактора и числа оборотов привода мешалки реактора на размер, степень полидисперсности и стабильность образующихся частиц латексов. Установили, что при капельном введении смеси «стирол – лауриновая кислота» (далее – рабочей смеси) в реактор на малых оборотах степень полидисперсности получаемого образца латексных сфер намного ниже (см. таблицу, образец 1), чем при единовременном поступлении всего объёма рабочей смеси в реактор (см. таблицу, образец 2). При введении всего объёма рабочей смеси также увеличивается медианное значение размеров частиц латексных сфер, полученное по результатам измерений анализаторами размеров частиц. Однако процесс наращивания в случае обоих методов приготовления эмульсии сопровождается параллельной полимеризацией стирола из системы мономер-ПАВ даже при концентрации ПАВ в диапазоне 0,5–1,0 % по массе относительно количества введенного стирола. Указанная концентрация ПАВ (согласно результатам экспериментов [3, 12]) исключает образование коагулята или возникновение параллельной полимеризации стирола (см. таблицу, образец 3). В процессе наращивания частиц при малых оборотах мешалки центробежной силы недостаточно, и в процессе полимеризации происходит осаждение частиц по мере увеличения их молекулярной массы. На поверхности раздела фаз стирол/вода увеличивается соотношение количества мономера к водной фазе, в которой растворены ПАВ и инициатор. Это приводит к параллельной полимеризации избытка стирола по мере уменьшения числа зародышевых частиц на границе раздела фаз. При измерениях размеров частиц образца 3 методами ДРС и ДЛИ (рис. 1, а, в) регистрируется бимодальное распределение частиц по размерам, причём мода 0,16–0,18 мкм (см. таблицу) соответствует значению наименьших стабильных частиц полистирольных сфер для водной среды с уже растворённым в ней лауратом калия [2].

Чтобы избежать параллельной полимеризации вносимого стирола на границе раздела фаз, в процессе наращивания увеличили обороты мешалки реактора до образования относительно тонкого слоя реакционной смеси. Таким образом, исключалась возможность седиментации частиц с большим молекулярно-массовым значением.

Исходную суспензию для проведения затравочной полимеризации (образец 4) получили единовременным введением всего расчётного количества рабочей смеси в предварительно подготовленную водную среду. В процессе полимеризации отбирали пробы реакционной смеси каждые 60 мин с момента введения рабочей смеси. Степень конверсии стирола контролировали путём регистрации электронных спектров пропускания в ультрафиолетовом диапазоне. Для образцов 4, 5 построены кинетические кривые (рис. 2), описывающие изменения степени пропускания T на длине волны 300 нм. Значения T уменьшаются пропорционально увеличению оптической плотности образца, что свидетельствует об увеличении числа рассеивающих частиц в суспензии. Расчётные значения электронного спектра поглощения для π - π связи бензольного кольца в молекуле стирола составляют 282 и 293 нм [14]. Соответственно, в водной эмульсии стирола с ПАВ на длине волны 300 нм регистрируется количественное и качественное превращение стирола в процессе полимеризации. Установили, что наибольшая степень конверсии

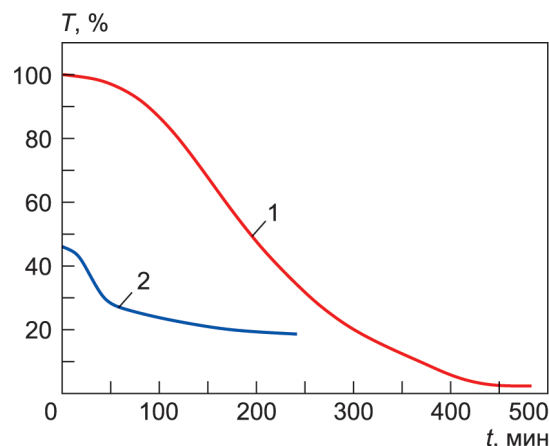


Рис. 2. Кинетические кривые 1, 2 для образцов 4, 5 соответственно

Fig. 2. Kinetic curves: sample 4 (1), sample 5 (2)

для образца 4 согласно построенной кинетической кривой достигается при времени полимеризации 450 мин.

Последнюю пробу образца отобрали спустя 480 мин с момента введения стирол-лауриновой смеси. Медианный размер полученных латексных сфер в образце 4 составляет 0,31 мкм, степень полидисперсности 1,03 по результатам 10 измерений из расчёта отношения средневесового диаметра к среднечисловому диаметру, определённых методом ДЛИ.

Наращивание проводили покапельным введением стирола в реактор с момента стабилизации температуры и прекращения продувки аргоном (образец 5). Первую пробу отобрали в момент начала дозации стирола, затем с интервалом 20 мин отобрали три пробы и далее пробы отбирали каждые 60 мин до момента достижения наибольшей степени конверсии на кинетической кривой. Наиболее показательны результаты, полученные методом ДЛИ для образца 5 в интервале 20–180 мин с момента начала введения стирола. По распределению частиц по размерам можно наблюдать увеличение размера частиц и образование (предположительно) промежуточных частиц эмульсии, состоящих из солюбилизованного ПАВ стирола. Методом ДРС частицы эмульсии не детектируются, поскольку солюбилизованный (термодинамически стабильный изотропный раствор) ПАВ стирол флотирует на поверхность измерительной кюветы, в то время как частицы латексных сфер и агрегаты находятся в зоне рассеяния лазера. Определить, что это не частицы суспензии, можно путём сравнения распределений частиц по размерам, найденным методом ДРС, когда в образце присутствуют частицы двух фракций, примерно в два раза различающихся по размерам/молекулярно-массовому распределению, т. е. полученных при наращивании на малых оборотах. Методом ДРС установили, что для образца с двумя разными, но близкими по размерам твёрдыми фазами, характерно широкое полидисперсное, но мономодальное распределение по размерам (см. рис. 1, б, г). Измерение методом ДЛИ в силу специфики пробоподготовки, а именно циркуляции малого количества образца, растворённого в избытке дисперсионной среды, позволило наблюдать и частицы суспензии (т. е. частицы латексных сфер), и частицы эмульсии солюбилизованного ПАВ стирола (см. рис. 1, г). Стирол

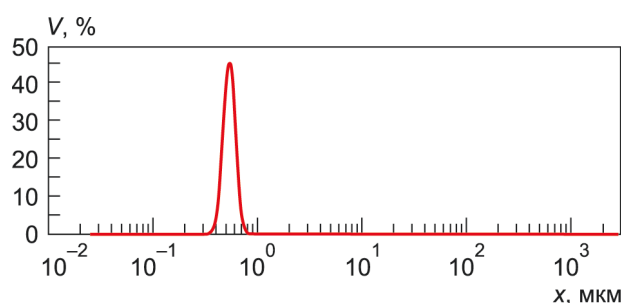


Рис. 3. Измеренное методом ДЛИ распределение частиц по размерам в образце 5

Fig. 3. Measured size distribution of sample 5 by the SLS method

и частицы латекса имеют близкие значения показателя преломления (1,54 и 1,59 соответственно). Установили, что в процессе полимеризации уменьшается число и размер частиц эмульсии, а медианное значение размера частиц латексов увеличивается. Спустя 4 ч полимеризации методом ДЛИ детектируются только монодисперсные частицы латексных сфер (рис. 3).

Медианный размер полученных латексных сфер в образце 5 составляет 0,54 мкм, степень полидисперсности по результатам 10 измерений составляет 1,01 из расчёта отношения средневесового диаметра к среднечисловому диаметру, определённых методом ДЛИ.

По результатам измерений размеров частиц в синтезированных образцах анализаторами из состава ГЭТ 163-2020 рассчитанные значения относительного СКО составили $S=6,0$ и $3,2\%$ (образец 4) и $S=3,8$ и $1,8\%$ (образец 5) методами ДРС и ДЛИ соответственно.

Закключение. Разработанная технология позволила получить стабильные монодисперсные образцы мер размера частиц в жидкости размером 0,31 и 0,54 мкм. Применение эмульсионной полимеризации стирола в условиях избытка дисперсионной среды улучшило метрологические характеристики полученных суспензий, однако необходимо учитывать, что технология чувствительна к количеству поверхностно-активного вещества в рабочей смеси. Значения относительного СКО для синтезированных образцов мер не превышают 6 %. Созданные меры обеспечат поверки, калибровки и испытания с целью утверждения типа анализаторов размеров частиц. Результаты выполненных исследований можно использовать для получения монодисперсных частиц размерами более 1 мкм методом затравочной полимеризации. Также интерес представляет дальнейшее изучение способов приготовления исходной микроэмульсии с целью улучшения метрологических характеристик синтезируемых латексных сфер для аттестации созданных мер размеров частиц в жидкости в качестве стандартных образцов.

Список источников / References

1. Беленький Д. И., Аверкин Д. В., Вишневецкий Д. В., Хижняк С. Д., Пахомов П. М. Исследования дисперсных

систем и разработка стандартных образцов дзета-потенциала частиц в жидкости // Измерительная техника. 2021. № 4. С. 58–62. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-4-58-62> [Belenkii D. I., Averkin D. V., Vishnevetskii D. V., et al., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 4, pp. 328–332.

<https://doi.org/10.1007/s11018-021-01936-y>

2. Грицкова И. А., Жаченков С. В., Прокопов Н. И., Ильменев П. Е. Эмульсионная полимеризация гидрофобных мономеров в высокодисперсных эмульсиях // Высокомолекулярные соединения. 1991. Т. (А) 33. № 7. С. 1476–1483. [Gritskova I. A., Zhachenkov S. V., Prokopov N. I., Ilmenev P. E., *Emulsion polymerization of hydrophobic monomers in highly dispersed emulsions*, *High-molecular Compounds*, 1991, vol. (A) 33, no. 7, pp. 1476–1483. (In Russ.)]

3. Прокопов Н. И., Грицкова И. А. Особенности гетерофазной полимеризации стирола при образовании поверхностно-активных веществ на границе раздела фаз // Успехи химии. 2001. № 9. С. 890–900. [Prokopov N. I., Gritskova I. A., *Russian Chemical Reviews*, 2001, vol. 70(9), pp. 890–900.

<https://doi.org/10.1070/RC2001v070n09ABEH000669>

4. Tuncel A., Piskin E., *Biomat., Art. Cells & Immob. Biotech.*, 1991, vol. 19, no. 1, pp. 229–253.

<https://doi.org/10.3109/10731199109117830>

5. Brouwer W. M., *Journal of Applied Polymer Science*, 1989, vol. 38, pp. 1335–1346.

<https://doi.org/10.1002/app.1989.070380712>

6. Ugelstad J., El-Aasser M. S., Vanderhoff J. W., *Polymer Letters Edition*, 1973, vol. 11, pp. 503–513.

<https://doi.org/10.1002/pol.1973.130110803>

7. Paulen R., Benyahia B., Latifi M. A., Fikar M., *Computer Aided Chemical Engineering*, 2013, vol. 32, pp. 721–726.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63234-0.50121-4>

8. Alexandra J. Macbeth, Zhuangsheng Lin, Julie M. Goddard, *MethodsX*, 2020, vol. 7, 101110.

<https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101110>

9. Wang T., Shi S., Yang F., Zhou L. M., Kuroda S., *J. Mater. Sci.*, 2010, vol. 45, pp. 3392–3395.

<https://doi.org/10.1007/s10853-010-4449-9>

10. Fan Xinlong, Jia Xiangkun, Zhang Hepeng, Zhang Baoliang, Li Chunmei, Zhang Qiuyu, *Langmuir*, 2013, vol. 29, pp. 11730–11741. <https://doi.org/10.1021/la402759w>

11. Sudol E. D., El-Aasser M. S., Vanderhoff J. W., *J. of Pol. Sci. Part A: Pol. Chem.*, 1986, vol. 24, pp. 3499–3513.

<https://doi.org/10.1002/pola.1986.080241231>

12. Vanderhoff J. W., Vitkuske J. F., Bradford E. B., Alfrey Jr. T., *J. of Pol. Sci.*, 1956, vol. 20, pp. 225–234.

<https://doi.org/10.1002/pol.1956.120209501>

13. Thomson B., Rudin A., Lajoie G., *J. of Pol. Sci. Part A: Pol. Chem.*, 1995, vol. 33, pp. 345–357.

<https://doi.org/10.1002/pola.1995.080330301>

14. Uyar Tamer, El-Shafei Ahmed, Wang Xingwu, Hacıoglu Jale, Tonelli Alan, *J. of Incl. Phen. and Macr. Chem.*, 2006, vol. 55, pp. 109–121. <https://doi.org/10.1007/s10847-005-9026-5>

Статья поступила в редакцию 03.09.2022; одобрена после рецензирования 09.11.2022; принята к публикации 11.11.2022.
The article was submitted 03.09.2022; approved after reviewing 09.11.2022; accepted for publication 11.11.2022.

Перечень статей, опубликованных в 2022 г.

Всемирный день метрологии – 20 мая 2022 года

Приветствие директора Международного бюро мер и весов М. Милтона и директора Международного бюро законодательной метрологии Э. Доннеллана	5	3
---	---	---

К юбилею института

Пронин А.Н., Гинак Е.Б. 180 лет единству и точности измерений в России.....	7	3
---	---	---

ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЭТАЛОНЫ

Адерихин В.И., Малай И.М., Маркова М.С., Саргсян М.В., Фартушин М.И. Государственный первичный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц ГЭТ 21-2021	12	3
Асланян А.Э., Асланян Э.Г., Гаврилкин С.М., Дойников А.С., Петухов А.А., Сорокина П.В., Щипунов А.Н., Юров Л.В. Государственный первичный эталон твёрдости по шкалам Бринелля ГЭТ 33-2020	5	10
Бакшеев В.Г., Панин В.И., Шулатов А.В., Волков А.А., Крокош Т.В. Государственный первичный эталон единиц амплитуды ультразвукового смещения, колебательной скорости поверхности твёрдых сред и коэффициента электроакустического преобразования ГЭТ 194-2022	9	8
Бирюков С.Г., Коваленко О.И., Орлов А.А. Государственный первичный эталон единиц объёмной активности радиоактивных аэрозолей, радона, торона и плотности потока радона ГЭТ 39-2021	8	3
Виллевалде А.Ю., Оборин А.В. Государственный первичный специальный эталон единиц поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы в тканезквивалентном материале рентгеновского излучения с граничной энергией фотонов от 10 до 60 кэВ ГЭТ 73-2022	7	8
Винге М.А., Морозов С.А. Государственный первичный эталон единиц относительной влажности газов, молярной (объёмной) доли влаги, температуры точки росы/иней, температуры конденсации углеводородов ГЭТ 151-2020	10	3
Вишняков Г.Н., Минаев В.Л., Бочкарева С.С. Государственный первичный эталон единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021	5	3
Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Космина М.А., Фомкина З.В., Чекирда К.В. Современное состояние эталонной базы Российской Федерации в области измерений длины и угла	7	18
Каминский О.В., Мыльников А.В., Могилев И.В., Тищенко В.А. Государственный первичный эталон единицы девиации частоты ГЭТ 166-2020	4	3
Карауш Е.А., Печерица Д.С. Государственный первичный специальный эталон координат местоположения ГЭТ 218-2022: исследование метрологических характеристик	11	3
Катков А.С., Петровская А.Н., Гублер Г.Б., Шевцов В.И. Перспективы применения квантовых мер напряжения на эффекте Джозефсона для совершенствования эталонов вольты	7	30
Колобова А.В. Развитие эталонной базы и средств метрологического обеспечения газоаналитических измерений в Российской Федерации	7	36
Коудельный А.В., Малай И.М., Матвеев А.И., Перепелкин В.А., Чирков И.П. Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 37,5–118,1 ГГц ГЭТ 167-2021	6	3
Паринов С. Т., Клезович О. А., Смирнов А. А. Государственный первичный эталон единицы напряжённости электрического поля в диапазоне частот 0–20 кГц ГЭТ 158-2020	4	8
Петухов А.А., Потапов Б.Г., Кытин В.Г., Юров Л.В., Асланян Э.Г., Щипунов А.Н. Государственный первичный специальный эталон единицы теплопроводности твёрдых тел в диапазоне температур от 2 до 300 К ГЭТ 141-2020	9	3
Походун А.И., Сильд Ю.А., Визулайнен Е.В., Иванова М.А. Государственный первичный эталон единицы энергетической яркости инфракрасного излучения ГЭТ 48-2018	7	13
Прокунин С.В., Щипунов А.Н., Добровольский В.И., Веньгина Д.А. Государственный первичный эталон показателя рН активности ионов водорода в водных растворах ГЭТ 54-2019	9	14
Чекирда К.В., Демьянов А.А., Неклюдова А.А., Домостроев А.В., Сулаберидзе В.Ш. История создания и модернизация государственных первичных эталонов единиц динамической, кинематической вязкости жидкости и плотности	7	24
Шилов А.М., Загайнов С.Д., Мандруева А.Е., Рябчинский Д.В., Ульянов Е.Ю. Государственный первичный специальный эталон единицы электрической ёмкости в диапазоне частот от 1 до 300 МГц ГЭТ 107-2019	8	9

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ

Бронников К.А., Иващук В.Д., Хрущев В.В. Фундаментальные физические константы: результаты поиска и описания вариаций	3	3
--	---	---

ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ

Левин С.Ф. Шкала космологических расстояний. Часть 13: галактическая полярная анизотропия красного смещения квазаров и сверхновых типа SN Ia	10 11
--	-------

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Баженов А.Н., Тельнова А.Ю. Обобщение коэффициента Жаккара для анализа данных с интервальной неопределённостью	12 15
Бурмистрова Н.А., Викторов И.В., Чуновкина А.Г. Метрологическая аттестация алгоритма оценивания несогласованных данных ключевых сличений национальных эталонов	7 43
Власов П.В., Храпов Ф.И., Жуков А.А. Оценка точности алгоритмов обработки апостериорных результатов измерений, полученных от троированных измерительных каналов	1 12
Волосников А.С. Измерительная система на основе нерекурсивных фильтров с оптимальной коррекцией погрешности динамического измерения	10 19
Григорьев С.Н., Емельянов П.Н., Мастеренко Д.А., Педь С.Е. Выборочный измерительный контроль партий деталей с распределением размера по закону Рэлея	6 28
Григорьев С.Н., Емельянов П.Н., Мастеренко Д.А., Педь С.Е. Построение двухпараметрических процедур измерительного контроля партий деталей с распределением размера по закону Рэлея	9 24
Григорьев С.Н., Емельянов П.Н., Мастеренко Д.А., Педь С.Е. Способ построения контрольных карт для производственного процесса с распределением показателя качества по закону Рэлея	11 17
Жирабок А.Н., Зуев А.В., Проценко А.А., Ким Чхун Ир. Методы построения робастных виртуальных датчиков	6 17
Захаров О.В., Лаптев А.Г., Лысенко В.Г., Милованова Е.А., Табачникова Н.А. Дискретный алгоритм на основе кусочно-линейной интерполяции для дискового морфологического фильтра	8 35
Козырев Г.И., Кибенко А.В., Усиков В.Д. Расчёт допустимой временной задержки дискретных отсчётов при измерениях в режиме реального времени	6 23
Колобаев В.А., Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Устюжанин Е.Е., Плов П.В., Рыков В.А., Козлов А.Д. Термодинамические свойства хладагента R1233zd(E): методика построения фундаментального уравнения состояния и табулированные данные	5 22
Колобаев В.А., Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Устюжанин Е.Е., Попов П.В., Рыков В.А., Козлов А.Д. Единое фундаментальное уравнение состояния аргона: методика построения в рамках теории скейлинга и таблицы стандартных справочных данных	11 9
Кулешов И.А. Регуляризация задачи контроля состояний групповых объектов лётных испытаний	12 23
Лапко А.В., Лапко В.А., Бахтина А.В. Применение непараметрического алгоритма распознавания образов в задаче проверки гипотезы о независимости переменных неоднозначных функций	1 17
Лапко А.В., Лапко В.А. Нетрадиционная методика выбора коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрической регрессии	2 3
Лапко А.В., Лапко В.А. Методика быстрого выбора коэффициентов размытости ядерных функций непараметрической регрессии	8 17
Левин С.Ф. Системные аспекты теории измерительных задач	1 3
Левин С.Ф. О формате представления неопределённостей при решении измерительных задач	4 14
Левин С.Ф. Измерения и вычисления – предмет современной метрологии	5 15
Левин С.Ф. Руководство JCGM GUM-6:2020: комментарии к переводу на русский язык	6 9
Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. Нормирование погрешности косвенных измерений при приёмо-сдаточных испытаниях двигателей	8 23
Медведевских С.В., Тетерук Р.А. Интервалы между поверками средств измерений: методические и нормативно-правовые аспекты определения	7 49
Мостовской М.В. Регулируемый электропривод для лазерных технологических установок: оценка метрологических характеристик методом схемотехнического моделирования	2 8
Хайруллин Р.З. Многошаговый алгоритм построения статистических оценок на основе байесовского подхода в измерительных задачах	4 23
Хайруллин Р.З. Оптимизация процессов эксплуатации и обновления парка измерительной техники	8 28
Чернышев С.Л., Чернышев А.С. Метрологические аспекты гармоничной самоорганизации	3 9
Чикмарев А.Д. Сравнение критериев идентификации математических моделей при решении измерительных задач	8 41
Чирков А.П. Национальная система измерений и национальная метрологическая инфраструктура: анализ документов D1 Международной организации законодательной метрологии	12 10
Чув А.С. Системное представление физических величин: визуализация размерностных соотношений физических закономерностей	9 18

ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ

ИЗМЕРЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Безменов И.В., Дроздов А.Э., Пасынок С.Л. Стратегия поиска выбросов в рядах зашумлённых данных с неизвестным трендом	5 29
Кулешов И.А. Нейросетевое детектирование групповых объектов испытаний по гиперспектральным маркерам при внешнетраекторных измерениях	3 17

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Бусурин В.И., Казарьян А.В., Штек С.Г., Жеглов М.А., Васецкий С.О., Чжи Пхай Линн. Рамочный микрооптоэлектромеханический преобразователь угловой скорости с узлами оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта	5 50
Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Кабардин И.К., Рахманов В.В., Зуев В.О. Метод фазовой триангуляции со статистической фильтрацией для измерений в условиях случайных аддитивных помех и ограниченного динамического диапазона фотоприёмника	6 36
Захаров О.В., Пугин К.Г. Выбор опорных окружностей при анализе круглости деталей подшипников качения	2 14
Зуев В.О., Двойнишников С.В., Кабардин И.К., Меледин В.Г. Система измерения трёхмерной геометрии методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея: программный комплекс для настройки	8 46
Кодесс Б.Н. Влияние кривизны поверхности стандартных образцов кремния на его структурные характеристики	5 35
Мостовской М.В., Слепцов В.В., Снедков А.Б. Теоретическая оценка работоспособности регулируемого электропривода координатной системы лазерной установки	5 42
Павлов П.А., Иващенко Е.М. Влияние подшипникового узла динамического гониометра на погрешность измерений	8 52
Рощин Д.А. Погрузка гусеничной техники своим ходом на автоприцеп: управление с помощью системы технического зрения	1 23
Рощин Д.А. Применение системы машинного зрения для контроля пространственного положения строительной техники	3 29
Ямников А.С., Даниленко Е.А. Влияние погрешности формы измерительной базы на точность изготовления деталей из штампованных заготовок	3 24

ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ

Матвеев Е.В., Берестов В.В. Разработка и апробация методики непрерывного измерения массы образцов диэлектрических материалов при микроволновой термообработке	12 30
---	-------

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Арумов Г.П., Бухарин А.В. Выбор оптимальных трасс для дистанционных измерений микроструктуры рассеивающего объекта	10 31
Вишняков Г.Н., Минаев В.Л., Бочкарева С.С. Эталонная установка для воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения единицы показателя преломления твёрдых веществ	10 26
Григорьевский В.И., Садовников В.П., Элбакидзе А.В. Дистанционный мониторинг метана в атмосфере Земли на основе лидара с мощным оптическим усилителем	3 40
Евтихий Н.Н., Родин В.Г., Савченкова Е.А., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. Адаптивный итеративный метод подбора весовых коэффициентов операции диффузии ошибки для бинаризации цифровых голограмм	6 41
Киргетов М.В. Измерение диаметра пятна и расходимости пучка лазерного излучения теньевым методом с использованием обобщённых параметров	11 31
Колпаков А.И., Райцин А.М., Улановский М.В. Прослеживаемость измерений энергетических параметров лазерного пучка	1 35
Колпаков А.И., Райцин А.М., Улановский М.В. Метод расширения диапазона измерений энергии вторичного эталона при калибровке и поверке лазерных джоульметров	11 25
Кривошеев И.А., Попова А.В. Автоматизированный способ определения времени отклика фотоприёмников	3 36
Небавский В.А., Стариков Р.С. Оценка эффективности применения высокоразрешающих анализаторов оптического спектра для характеристики аналоговых оптических трактов с внешней модуляцией	12 40
Привалов В.Е., Чербачи Ю.В., Шеманин В.Г. Влияние пропускания атмосферы на точность лидарного измерения мощности рассеяния Ми частицами аэрозоля	1 30

ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ

Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Измерение концентрации молекул водорода в атмосфере: компьютерное моделирование лидарного уравнения для дифференциального поглощения и рассеяния ...	11	38
Райцин А.М., Улановский М.В. Основы идентификации пространственных распределений интенсивности лазерных пучков	4	30
Фатеев В.Ф., Колмогоров О.В. Определение разности гравитационных потенциалов в поле Земли на основе измерения гравитационной задержки световых волн в оптическом волокне	9	33
Юрин А.И., Вишняков Г.Н., Минаев В.Л. Измерение показателя преломления с помощью модифицированного метода постоянного отклонения	12	35

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

Антропов С.Ю., Глазов Е.Ю., Наумов А.В., Смирнов Ю.Ф. Повышение оперативности контроля и надёжности формирования шкалы времени группы водородных стандартов времени и частоты	11	44
Вялых А.П., Семенко А.В., Сутырин Д.В., Белотелов Г.С., Слюсарев С.Н. Комплекс микрогравитационных испытаний для мобильных и портативных оптических стандартов частоты	3	45
Карауш А.А. Автоматическая система сличения и прогнозирования расхождений шкал времени удалённых эталонов времени на основе фазовых измерений глобальных навигационных спутниковых систем	9	40
Фатеев В.Ф., Смирнов Ф.Р., Донченко С.С. Измерение эффекта гравитационного замедления времени дуплексным наземным квантовым нивелиром	2	22

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Биккулов В.Ш., Кондаков А.В. Уровнемерная установка УУЭ1р-Н-20 на основе лазерной интерферометрической измерительной системы	9	45
Волобуев В.С., Горбушин А.Р., Завьялов В.А. Верификация метода оценки систематических погрешностей стенда для калибровки шестикомпонентных тензометрических весов	2	44
Даев Ж.А., Шопанова Г.Е. Применение машины опорных векторов для моделирования коэффициента истечения расходомеров переменного перепада давлений	4	37
Жаров М.В. Измерительно-управляющая система термокомпрессионного оборудования с регламентированными температурно-скоростными параметрами деформирования	12	46
Медведевских С.В., Чекирда К.В. Исследование макета ватт-весов с верхним пределом измерений 10 грамм ...	2	28
Савенков А.П., Сычёв В.А. Модель измерений вязкости бесконтактным аэрогидродинамическим методом	11	57
Трибушевская Л.А., Шимолин Ю.Р. Первичная референтная методика измерений деформации поверхности упругодеформированной балки	2	34
Чекирда К.В., Янковский А.А., Лобашев А.А. Макет ватт-весов: математическое моделирование вертикальных направляющих на основе ирисовых пружин	11	51

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Беляев В.П., Беляев М.П., Мищенко С.В., Беляев П.С. Сравнение метрологических характеристик методов неразрушающего контроля коэффициента диффузии в тонких пористых материалах	5	69
Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Калмыков А.И. Повышение точности измерения температуры: метод двухпроводного подключения термометра сопротивления	3	53
Компан Т.А., Кулагин В.И., Власова В.В., Кондратьев С.В., Пухов Н.Ф. Результаты исследования теплофизических свойств перспективных материалов	7	58
Мамонтов А.В., Нефёдов В.Н., Хриткин С.А. Совершенствование методики измерений распределения температуры полимерных композитных листовых материалов при нагреве микроволновым излучением	6	46
Назаренко Л.А., Неежмаков П.И., Пущин Р.В., Филь С.В. Температурная шкала в диапазоне 692,67–1234,93 К: построение по инфракрасному излучению	2	61
Окладников В.М., Полунин С.П., Бекетов Н.А., Походун А.И. Модернизация Международной температурной шкалы МТШ-90: тройная точка диоксида углерода вместо тройной точки ртути	7	54

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Давыдов В.В., Мязин Н.С., Давыдов Р.В. Ядерно-магнитный расходомер-релаксометр для контроля расхода и состояния теплоносителя в первом контуре ядерного реактора подвижного объекта	4	49
---	---	----

ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ

Давыдов В.В., Мязин Н.С., Давыдов Р.В. Мультифазный ядерно-магнитный расходомер-релаксометр для контроля состояния и быстроизменяющихся расходов нефтяных смесей	6 52
Епифанцев К. В., Ефремов, Н. Ю. Шишкова М. М. Оценка погрешностей прототипа вольтметра на базе микроконтроллера ATmega8 и виртуальной модели вольтметра в среде Proteus	8 58
Марков А. Ф., Хвостов В. А. Алгоритм синхронизации результатов измерений положения электромеханической системы и электродвижущей силы индукции при реализации динамического режима весов Киббла	1 41
Насиров Т.З., Жабборов Х.Ш. Методика коррекции температурной погрешности преобразователя влажности с цилиндрическим электродом	12 52
Николаев Ю.Л., Саморуков А.А., Борисенко А.А. Расчётные и экспериментальные методы оценки характеристик чувствительности виброиндукционного преобразователя	10 37
Первухин Б.С., Кривобоков Д.Е., Соловьев В.А. Сравнительный анализ методов определения параметров измерительного преобразователя контактного кондуктометра	1 46
Плотников С.М. Анализ методов определения потерь в магнитопроводе трансформатора	1 52
Рано Д., Елизаров А.А., Скуридин А.А., Закирова Э.А. Геометрический метод определения фазового сдвига при отражении электромагнитной волны от конформной метаповерхности чувствительного элемента	4 43
Тищенко В.А., Лукьянов В.И., Смирнов А.А. Электрическое поле симметрично возбуждаемого экранированного конденсатора с дополнительными электродами	9 52

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Бойков И.В., Пивкина А.А. Восстановление сигналов по амплитуде спектра	10 44
Зенченко М.А., Клеопин А.В., Макаров В.В., Селин Л.Н. Копланарная линия на подложке из арсенида галлия для электрооптической стробоскопической измерительной системы с полосой пропускания более 110 ГГц	1 62
Костоготов А.А., Калиенко И.В., Корнев А.С., Лазаренко С.В. Синтез алгоритмов компенсации систематических погрешностей на основе построения полиномиальных математических моделей радиолокационных измерений	4 59
Кочеров А.В., Семенов А.Б., Руденко В.И., Смирнова В.В. Минимизация методической погрешности измерений частотных характеристик волнового сопротивления витых пар	9 57
Лупанова Е.А., Никулин С.М. Измерение волнового сопротивления микрополосковой линии векторным анализатором цепей	5 62
Матвеев А.И. Волноводные термисторные ваттметры оконечного типа в диапазоне частот 16,7–37,5 ГГц	1 58
Могилев И.В., Баженов Н.Р. Метод воспроизведения нормированных сигналов с цифровой модуляцией	5 56
Хаблов Д.В. Система управления беспилотными транспортными электрокарами на основе радиоволновых доплеровских датчиков	2 66

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Головин Д.В. Модуль комплексного акустического импеданса воздуха в цилиндрическом замкнутом объеме: расчёт с помощью численного моделирования	11 65
Исаев А.Е., Хатамтаев Б.И. Эквивалентный размер и акустический центр измерительного гидрофона	12 58
Козочкин М.П., Сабиров Ф.С. Применение гибких волноводов для виброакустического мониторинга технологических процессов в вакуумных камерах	3 59
Лукашкин В.Г., Прилепко М.Ю. Фазовая регистрация возмущений флуктуирующих сред с помощью пространственно-разнесённого радиоакустического генератора	1 68
Савченко А.В., Савченко В.В. Метод измерений интенсивности потока гласных звуков речи для аудиовизуальных диалоговых информационных систем	3 65
Савченко А.В., Савченко В.В. Адаптивный метод измерения частоты основного тона с использованием двухуровневой авторегрессионной модели речевого сигнала	6 60
Савченко В.В. Совершенствование методики измерения показателя точности авторегрессионной модели речевого сигнала	10 58
Хатамтаев Б.И., Щерблюк Н.Г. Экспериментальное определение акустического центра измерительного гидрофона	10 53

ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Жуков Г.В., Алексеев И.В., Коростин С.В., Токарев Н.А., Белугин К.В., Озерская А.В., Ганиева Р.М. Единица активности ⁶⁸ Ga: прослеживаемость к государственному первичному эталону	7 63
---	------

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Чуновкина А.Г., Тумилович А.А., Степанов А.В., Вонский М.С., Ковязина Н.А., Алхутова Н.А., Эмануэль В.Л. Оценивание неопределённости измерений в лабораторной медицине	7 69
--	------

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Аверкин Д.В. Синтез мер размера частиц на основе водных суспензий полистирольных латексных сфер	12 64
Аронов И.П., Аронов П.М., Собина Е.П. Повышение точности измерений коэффициента абсолютной газопроницаемости методом стационарной фильтрации	6 67
Икрамов Г.И., Каландаров П.И. Измерение влажности зерна и зернопродуктов сверхвысокочастотным методом: влияние неоднородности по плотности зерна на массовое отношение влаги	9 71
Каландаров П.И. Высокочастотный влагомер для измерения влажности зерна и зернопродуктов	4 65
Крылов А.И., Будко А.Г., Михеева А.Ю., Ткаченко И.Ю., Нежиховский Г.Р. Референтная методика измерений содержания фталатов в полимерных матрицах: аналитические и метрологические подходы	10 64
Медведевских М.Ю., Сергеева А.С., Шохина О.С., Крашенинина М.П. Особенности разработки стандартных образцов фармацевтических субстанций	9 63
Митрофанова С.А., Муравьева И.В. Выбор по комплексному показателю качества методики количественного химического анализа для определения хлорид-иона в бетонных и железобетонных конструкциях	8 68
Тюрин Д.Н., Котенев В.А. Метод фазоспектральной эллипсометрии для неразрушающего контроля химического состава тонких металл-оксидных гетероструктур	8 62

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

Крутиков В.Н., Окрепилов В.В. Метрология денег 2.0	2 51
--	------

ЮБИЛЕИ

К 85-летию В.И. Телешевского	8 75
------------------------------------	------

Алфавитный указатель – 2022

- Аверкин Д. В. № 12, 64
 Адерихин В. И. № 12, 3
 Алексеев И. В. № 7, 63
 Алхутова Н. А. № 7, 69
 Антропов С. Ю. № 11, 44
 Аронов И. П. № 6, 67
 Аронов П. М. № 6, 67
 Арумов Г. П. № 10, 31
 Асланян А. Э. № 5, 10
 Асланян Э. Г. № 5, 10; № 9, 3
 Баженов А. Н. № 12, 15
 Баженов Н. Р. № 5, 56
 Бакшеев В. Г. № 9, 8
 Бахтина А. В. № 1, 17
 Безменов И. В. № 5, 29
 Бекетов Н. А. № 7, 54
 Белотелов Г. С. № 3, 45
 Белугин К. В. № 7, 63
 Беляев В. П. № 5, 69
 Беляев М. П. № 5, 69
 Беляев П. С. № 5, 69
 Берестов В. В. № 12, 30
 Биккулов В. Ш. № 9, 45
 Бирюков С. Г. № 8, 3
 Бойков И. В. № 10, 44
 Бондарь О. Г. № 3, 53
 Борисенко А. А. № 10, 37
 Бочкарева С. С. № 5, 4; № 10, 26
 Брежнева Е. О. № 3, 53
 Бронников К. А. № 3, 3
 Будко А. Г. № 10, 64
 Бурмистрова Н. А. № 7, 43
 Бусурин В. И. № 5, 50
 Бухарин А. В. № 10, 31
 Васецкий С. О. № 5, 50
 Веньгина Д. А. № 9, 14
 Визулайнен Е. В. № 7, 13
 Викторов И. В. № 7, 43
 Виллевальде А. Ю. № 7, 8
 Винге М. А. № 10, 3
 Вишняков Г. Н. № 5, 4; № 10, 26; № 12, 35
 Власов П. В. № 1, 12
 Власова В. В. № 7, 58
 Волков А. А. № 9, 8
 Волобуев В. С. № 2, 44
 Волосников А. С. № 10, 19
 Вонский М. С. № 7, 69
 Вялых А. П. № 3, 45
 Гаврилкин С. М. № 5, 10
 Ганиева Р. М. № 7, 63
 Гинак Е. Б. № 7, 3
 Глазов Е. Ю. № 11, 44
 Головин Д. В. № 11, 65
 Горбушин А. Р. № 2, 44
 Григорьев С. Н. № 6, 28; № 9, 24; № 11, 17
 Григорьевский В. И. № 3, 40
 Гублер Г. Б. № 7, 30
 Давыдов В. В. № 4, 49; № 6, 52
 Давыдов Р. В. № 4, 49; № 6, 52
 Даев Ж. А. № 4, 37
 Даниленко Е. А. № 3, 24
 Двойнишников С. В. № 6, 36; № 8, 46
 Демьянов А. А. № 7, 24
 Добровольский В. И. № 9, 14
 Дойников А. С. № 5, 10
 Домостроев А. В. № 7, 24
 Донченко С. С. № 2, 22
 Дроздов А. Э. № 5, 29
 Евтихийев Н. Н. № 6, 41
 Елизаров А. А. № 4, 43
 Емельянов П. Н. № 6, 28; № 9, 24; № 11, 17
 Епифанцев К. В. № 8, 58
 Ефремов Н. Ю. № 8, 58
 Жабборов Х. Ш. № 12, 52
 Жаров М. В. № 12, 46
 Жеглов М. А. № 5, 50
 Жирабок А. Н. № 6, 17
 Жуков А. А. № 1, 12
 Жуков Г. В. № 7, 63
 Завьялов В. А. № 2, 44
 Загайнов С. Д. № 8, 9
 Закирова Э. А. № 4, 43
 Захаренко Ю. Г. № 7, 18
 Захаров О. В. № 2, 14; № 8, 35
 Зенченко М. А. № 1, 62
 Зуев А. В. № 6, 17
 Зуев В. О. № 6, 36; № 8, 46
 Иванова М. А. № 7, 13
 Иващенко Е. М. № 8, 52
 Ивашук В. Д. № 3, 3
 Икрамов Г. И. № 9, 71
 Исаев А. Е. № 12, 58
 Кабардин И. К. № 6, 36; № 8, 46
 Казарьян А. В. № 5, 50
 Каландаров П. И. № 4, 65; № 9, 71
 Калиенко И. В. № 4, 59
 Калмыков А. И. № 3, 53
 Каминский О. В. № 4, 3
 Карауш А. А. № 9, 40
 Карауш Е. А. № 11, 3
 Катков А. С. № 7, 30
 Кибенко А. В. № 6, 23
 Ким Чхун Ир № 6, 17
 Киргетов М. В. № 11, 31
 Клезович О. А. № 4, 8
 Клеопин А. В. № 1, 62
 Коваленко О. И. № 8, 3
 Ковязина Н. А. № 7, 69
 Кодесс Б. Н. № 5, 35
 Козлов А. Д. № 5, 22; № 11, 9
 Козочкин М. П. № 3, 59
 Козырев Г. И. № 6, 23
 Колмогоров О. В. № 9, 33
 Колобаев В. А. № 5, 22; № 11, 9
 Колобова А. В. № 7, 36
 Колпаков А. И. № 1, 35; № 11, 25
 Компан Т. А. № 7, 58
 Кондаков А. В. № 9, 45
 Кондратьев С. В. № 7, 58
 Кононова Н. А. № 7, 18
 Корнев А. С. № 4, 59
 Коростин С. В. № 7, 63
 Костоготов А. А. № 4, 59
 Косьмина М. А. № 7, 18
 Котенев В. А. № 8, 62
 Коудельный А. В. № 6, 3
 Кочеров А. В. № 9, 57
 Крашенинина М. П. № 9, 63
 Кривобоков Д. Е. № 1, 46
 Кривошеев И. А. № 3, 36
 Крокош Т. В. № 9, 8
 Крутиков В. Н. № 2, 51
 Крылов А. И. № 10, 64
 Кудрявцева И. В. № 5, 22; № 11, 9
 Кулагин В. И. № 7, 58
 Кулешов И. А. № 3, 17; № 12, 23
 Кытин В. Г. № 9, 3
 Лазаренко С. В. № 4, 59
 Лапко А. В. № 1, 17; № 2, 3; № 8, 17
 Лапко В. А. № 1, 17; № 2, 3; № 8, 17
 Лаптев А. Г. № 8, 35
 Левин С. Ф. № 1, 3; № 4, 14; № 5, 15; № 6, 9; № 10, 11
 Леонов О. А. № 8, 23
 Лобашев А. А. № 11, 51
 Лукашкин В. Г. № 1, 68
 Лукьянов В. И. № 9, 52
 Лупанова Е. А. № 5, 62
 Лысенко В. Г. № 8, 35
 Макаров В. В. № 1, 62
 Малай И. М. № 6, 3; № 12, 3
 Мамонтов А. В. № 6, 46
 Мандруева А. Е. № 8, 9
 Марков А. Ф. № 1, 41
 Маркова М. С. № 12, 3
 Мастеренко Д. А. № 6, 28; № 9, 24; № 11, 17
 Матвеев А. И. № 1, 58; № 6, 3
 Матвеев Е. В. № 12, 30

- Медведевских С. В. № 2, 28; № 7, 49
- Медведевских М. Ю. № 9, 63
- Меледин В. Г. № 6, 36; № 8, 46
- Милованова Е. А. № 8, 35
- Минаев В. Л. № 5, 4; № 10, 26; № 12, 35
- Митрофанова С. А. № 8, 68
- Михеева А. Ю. № 10, 64
- Мищенко С. В. № 5, 69
- Могилев И. В. № 4, 3; № 5, 56
- Морозов С. А. № 10, 3
- Мостовской М. В. № 2, 8; № 5, 42
- Муравьева И. В. № 8, 68
- Мыльников А. В. № 4, 3
- Мязин Н. С. № 4, 49; № 6, 52
- Назаренко Л. А. № 2, 61
- Насиров Т. З. № 12, 52
- Наумов А. В. № 11, 44
- Небавский В. А. № 12, 40
- Неежмаков П. И. № 2, 61
- Нежиховский Г. Р. № 10, 64
- Неклюдова А. А. № 7, 24
- Нефёдов В. Н. № 6, 41
- Николаев Ю. Л. № 10, 37
- Никулин С. М. № 5, 62
- Оборин А. В. № 7, 8
- Озерская А. В. № 7, 63
- Окладников В. М. № 7, 54
- Окрепилов В. В. № 2, 51
- Орлов А. А. № 8, 3
- Павлов П. А. № 8, 52
- Панин В. И. № 9, 8
- Паринов С. Т. № 4, 8
- Пасынок С. Л. № 5, 29
- Педь С. Е. № 6, 28; № 9, 24; № 11, 17
- Первухин Б. С. № 1, 46
- Перепелкин В. А. № 6, 3
- Петровская А. Н. № 7, 30
- Петухов А. А. № 5, 10; № 9, 3
- Печерица Д. С. № 11, 3
- Пивкина А. А. № 10, 44
- Плотников С. М. № 1, 52
- Полунин С. П. № 7, 54
- Попов П. В. № 5, 22; № 11, 9
- Попова А. В. № 3, 36
- Потапов Б. Г. № 9, 3
- Походун А. И. № 7, 13, 54
- Привалов В. Е. № 1, 30; № 11, 38
- Прилепко М. Ю. № 1, 68
- Прокунин С. В. № 9, 14
- Пронин А. Н. № 7, 3
- Проценко А. А. № 6, 17
- Пугин К. Г. № 2, 14
- Пухов Н. Ф. № 7, 58
- Пушин Р. В. № 2, 61
- Райцин А. М. № 1, 35; № 4, 30; № 11, 25
- Рано Д. № 4, 43
- Рахманов В. В. № 6, 36
- Родин В. Г. № 6, 41
- Рощин Д. А. № 1, 23; № 3, 29
- Руденко В. И. № 9, 57
- Рыков В. А. № 5, 22; № 11, 9
- Рыков С. В. № 5, 22; № 11, 9
- Рябчинский Д. В. № 8, 9
- Сабиров Ф. С. № 3, 59
- Савенков А. П. № 11, 57
- Савченко А. В. № 3, 65; № 6, 60
- Савченко В. В. № 3, 65; № 6, 60; № 10, 58
- Савченкова Е. А. № 6, 41
- Садовников В. П. № 3, 40
- Саморуков А. А. № 10, 37
- Саргсян М. В. № 12, 3
- Селин Л. Н. № 1, 62
- Семенко А. В. № 3, 45
- Семенов А. Б. № 9, 57
- Сергеева А. С. № 9, 63
- Сильд Ю. А. № 7, 13
- Скуридин А. А. № 4, 43
- Слепцов В. В. № 5, 42
- Слюсарев С. Н. № 3, 45
- Смирнов А. А. № 4, 8; № 9, 52
- Смирнов Ф. Р. № 2, 22
- Смирнов Ю. Ф. № 11, 44
- Смирнова В. В. № 9, 57
- Снедков А. Б. № 5, 42
- Собина Е. П. № 6, 67
- Соловьев В. А. № 1, 46
- Сорокина П. В. № 5, 10
- Стариков Р. С. № 6, 41; № 12, 40
- Степанов А. В. № 7, 69
- Сулаберидзе В. Ш. № 7, 24
- Сутырин Д. В. № 3, 45
- Сычёв В. А. № 11, 57
- Табачникова Н. А. № 8, 35
- Тельнова А. Ю. № 12, 15
- Тетерук Р. А. № 7, 49
- Тищенко В. А. № 4, 3; № 9, 52
- Ткаченко И. Ю. № 10, 64
- Токарев Н. А. № 7, 63
- Трибушевская Л. А. № 2, 34
- Тумилович А. А. № 7, 69
- Тюрин Д. Н. № 8, 62
- Улановский М. В. № 1, 35; № 4, 30; № 11, 25
- Ульянов Е. Ю. № 8, 9
- Усиков В. Д. № 6, 23
- Устюжанин Е. Е. № 5, 22; № 11, 9
- Фартушин М. И. № 12, 3
- Фатеев В. Ф. № 2, 22; № 9, 33
- Филь С. В. № 2, 61
- Фомкина З. В. № 7, 18
- Хаблов Д. В. № 2, 66
- Хайруллин Р. З. № 4, 23; № 8, 28
- Хатамтаев Б. И. № 10, 53; № 12, 58
- Хвостов В. А. № 1, 41
- Храпов Ф. И. № 1, 12
- Хриткин С. А. № 6, 46
- Хрущев В. В. № 3, 3
- Чекирда К. В. № 2, 28; № 7, 18, 24; № 11, 51
- Чербачи Ю. В. № 1, 30
- Черёмхин П. А. № 6, 41
- Чернышев А. С. № 3, 9
- Чернышев С. Л. № 3, 9
- Чжи Пхай Линн № 5, 50
- Чикмарев А. Д. № 8, 41
- Чирков А. П. № 12, 10
- Чирков И. П. № 6, 3
- Чуев А. С. № 9, 18
- Чуновкина А. Г. № 7, 43, 69
- Шевцов В. И. № 7, 30
- Шеманин В. Г. № 1, 30; № 11, 38
- Шилов А. М. № 8, 9
- Шимолин Ю. Р. № 2, 34
- Шишкова М. М. № 8, 58
- Шкаруба Н. Ж. № 8, 23
- Шопанова Г. Е. № 4, 37
- Шохина О. С. № 9, 63
- Штек С. Г. № 5, 50
- Шулатов А. В. № 9, 8
- Щерблюк Н. Г. № 10, 53
- Щипунов А. Н. № 5, 10; № 9, 3, 14
- Элбакидзе А. В. № 3, 40
- Эмануэль В. Л. № 7, 69
- Юрин А. И. № 12, 35
- Юров Л. В. № 5, 10; № 9, 3
- Ямников А. С. № 3, 24
- Янковский А. А. № 11, 51



ПОДПИСКА – 2023

на ежемесячный научно-технический журнал
«Измерительная техника»

(печатное издание и электронная копия)

- ▶ онлайн на сайтах подписных агентств
- ▶ в редакции

ГК «Урал-Пресс»

«Измерительная техника»

38168 (печатное издание)

013315 (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 2016–2021 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, ФГБУ «ВНИИМС»

☎ +7 (495) 781-48-70

✉ izmt@vniims.ru

www.izmt.ru