



**ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА
2022
№5**



Всемирный
день метрологии



Метрология в эпоху цифровизации



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2022 № 5 май

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

Всемирный день метрологии – 20 мая 2022 года

Приветствие директора Международного бюро мер и весов М. Милтона и директора Международного бюро законодательной метрологии Э. Доннеллана 3

■ ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЭТАЛОНЫ

Г. Н. Вишняков, В. Л. Минаев, С. С. Бочкарева. Государственный первичный эталон единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021 4

А. Э. Асланян, Э. Г. Асланян, С. М. Гаврилкин, А. С. Дойников, А. А. Петухов, П. В. Сорокина, А. Н. Щипунов, Л. В. Юров. Государственный первичный эталон твёрдости по шкалам Бринелля ГЭТ 33-2020 10

■ ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

С. Ф. Левин. Измерения и вычисления – предмет современной метрологии 15

В. А. Колобаев, С. В. Рыков, И. В. Кудрявцева, Е. Е. Устюжанин, П. В. Попов, В. А. Рыков, А. Д. Козлов. Термодинамические свойства хладагента R1233zd(E): методика построения фундаментального уравнения состояния и табулированные данные 22

■ ИЗМЕРЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

И. В. Безменов, А. Э. Дроздов, С. Л. Пасынок. Стратегия поиска выбросов в рядах зашумлённых данных с неизвестным трендом 29

■ ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Б. Н. Кодесс. Влияние кривизны поверхности стандартных образцов кремния на его структурные характеристики 35

М. В. Мостовской, В. В. Слепцов, А. Б. Снедков. Теоретическая оценка работоспособности регулируемого электропривода координатной системы лазерной установки 42

В. И. Бусурин, А. В. Казарьян, С. Г. Штек, М. А. Жеглов, С. О. Васецкий, Чжи Пхай Линн. Рамочный микрооптоэлектромеханический преобразователь угловой скорости с узлами оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта 50

■ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

И. В. Могилев, Н. Р. Баженов. Метод воспроизведения нормированных сигналов с цифровой модуляцией 56

Е. А. Лупанова, С. М. Никулин. Измерение волнового сопротивления микрополосковой линии векторным анализатором цепей 62

■ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В. П. Беляев, М. П. Беляев, С. В. Мищенко, П. С. Беляев. Сравнение метрологических характеристик методов неразрушающего контроля коэффициента диффузии в тонких пористых материалах 69



**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

Научные редакторы *Грачева И. Л., Федяева М. В.*
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: 14.04.2022.
Подписано в печать: 27.05.2022.
Формат 60x90 1/8. Бумага мелованная. Печать офсетная.
Усл. п.л. 9,0. Уч.-изд. л. 11,5. Тир. 200 экз. Зак. 22-39д.
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

World Metrology Day – 20 May 2022

Message from M. Milton, Director of the BIPM and E. Donnellan, Director of the BML 3

■ STATE STANDARDS

G. N. Vishnyakov, V. L. Minaev, S. S. Bochkareva. State primary standard of refractive index GET 138-2021 4
A. E. Aslanyan, E. G. Aslanyan, S. M. Gavrilkin, A. S. Doynikov, A. A. Petukhov, P. V. Sorokina, A. N. Shchipunov, L. V. Yurov. National primary standard machine on Brinell hardness scales GET 33-2020 10

■ GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

S. F. Levin. Measurements and calculations are the subject of modern metrology 15
V. A. Kolobaev, S. V. Rykov, I. V. Kudryavtseva, E. E. Ustyuzhanin, P. V. Popov, V. A. Rykov, A. D. Kozlov. Thermodynamic properties of R1233zd(E) refrigerant: a technique for constructing the fundamental equation of state and tabulated data 22

■ MEASUREMENTS IN INFORMATION TECHNOLOGIES

I. V. Bezmenov, A. E. Drozdov, S. L. Pasynok. A strategy for finding outliers in noisy data series including an unknown trend 29

■ LINEAR AND ANGULAR MEASUREMENTS

B. N. Kodess. Influence of surface curvature of silicon reference materials on its structural characteristics 35
M. V. Mostovskoy, V. V. Sleptsov, A. B. Snedkov. Theoretical assessment of the operability of a controlled electric drive as part of the coordinate system of a laser installation 42
V. I. Busurin, A. V. Kazaryan, S. G. Shtek, M. A. Zheglov, S. O. Vasetskiy, Phay L. Kyi. Frame micro-optoelectromechanical angular velocity transducer with optical readout units based on the optical tunneling effect 50

■ RADIO MEASUREMENTS

I. V. Mogilev, N. R. Bazhenov. Method for digitally modulated signals synthesis with normalized parameters 56
E. A. Lupanova, S. M. Nikulin. Measurement of the impedance of a microstrip line with a vector network analyzer 62

■ TERMOPHYSICAL MEASUREMENTS

V. P. Belyaev, M. P. Belyaev, S. V. Mishchenko, P. S. Belyaev. Comparison of metrological characteristics of diffusion coefficient non-destructive testing methods in thin porous materials 69



Мартин Милтон
Директор МБМВ



Энтони Доннеллан
Директор МБЗМ

Метрология в эпоху цифровизации

Внедрение цифровых технологий революционным образом преобразует наше сообщество, совершенствуя процессы и открывая новые возможности. Сегодня это одна из самых захватывающих тенденций в развитии общества, характеризующаяся стремительным темпом изменений, которые происходят с нами ежедневно.

Одним из краеугольных камней цифровой трансформации является открытый и прозрачный обмен информацией. Всякий раз, когда нам нужна информация, она должна быть легко находимой и доступной в формате интероперабельности и неоднократного использования. Данные, отвечающие этим требованиям, известны сегодня как FAIR¹, должны быть обнаруживаемыми, доступными, интероперабельными и неоднократно используемыми. При соблюдении этих требований данные могут быть признаны как заслуживающие доверия и составлять основу методов работы с открытыми данными.

Для наиболее эффективного использования информации важно, чтобы все источники информации в новом цифровом мире были доступны для чтения не только людьми, но и машинами в доступных для них форматах. В таком случае машины смогут выполнять соответствующую работу («выполняемое машиной действие»), что можно будет использовать в качестве основы для новых приложений искусственного интеллекта.

Реализовать открывающиеся в результате цифровой трансформации возможности можно быстрее, если адаптировать глобальную инфраструктуру качества для продвижения и применения новых цифровых технологий, генерирующих и использующих данные на основе принципа FAIR. Метрология – наука об измерениях и их применении, являясь одной из центральных составляющих национальной и международной инфраструктуры качества, уже сейчас начинает обеспечивать запросы новой цифровой экономики.

Показательным примером деятельности по поддержанию цифровой трансформации является разработка МКМВ Цифровой платформы SI (SI Digital Framework). В основе этой платформы будет базовое представление (ядро) Международной системы единиц (SI), содержащее согласованные форматы базовых элементов данных, таких как величины, единицы, неопределённости, взятые из Брошюры SI. Это позволит национальным метрологическим институтам, МБМВ и связанным с ними организациям создавать новые услуги, руководствуясь SI и используя наилучшим образом открытые форматы данных, программные инструменты. Благодаря таким услугам будет обеспечена доступность данных для анализа, улучшено качество и открытость данных. Результатом Цифровой платформы SI станет разработка новых цифровых приложений для более широкого круга метрологического сообщества, а также для научных дисциплин, основанных на SI.

Применение цифровых измерительных платформ в промышленности и потребителями составляет единое целое с всеохватывающей и заслуживающей доверия цифровой трансформацией. Включение в документальные стандарты и технические регламенты цифровых принципов и методик изначально представляет область исследования МОЗМ. Цифровой сертификат соответствия, основанный на принципах FAIR, является частью этого контекста. Нашему сообществу цифровая трансформация в области метрологии может принести большую пользу. Например, ускорится ввод измерительных продуктов и услуг на рынок, меньше времени будет занимать процесс утверждения, что, в свою очередь, окажет благоприятное воздействие на инновационное развитие, темпы продвижения продукции и обеспечение устойчивости.

Путь, который предстоит пройти МБМВ и МОЗМ для достижения цели в области цифровизации, имеет двойное значение. Мы переведем наши виды деятельности и услуги в цифровой формат, а это, в свою очередь, обеспечит цифровую основу для всех пользователей данных по измерениям. Этот путь будет перспективным и невероятно увлекательным, и мы намерены совершить его вместе с нашими партнерами.

Подобную информацию о Всемирном дне метрологии 2022 года, а также плакат на тему *Метрология в эпоху цифровизации* см. на сайте <https://www.worldmetrologyday.org/>

¹ Применение принципов FAIR к данным было одобрено лидерами G20 в 2016 году на саммите в Ханчжоу. См. <https://www.go-fair.org>

Государственный первичный эталон единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021

Геннадий Николаевич Вишняков^{1✉}, Владимир Леонидович Минаев², Светлана Сергеевна Бочкарева³

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

¹ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

¹vish@vniiofi.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-0237-4738>

²minaev@vniiofi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4356-301X>

³sbochkareva@vniiofi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1827-6075>

Аннотация. Представлены состав, принцип работы и основные метрологические характеристики Государственного первичного эталона единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021. Эталон обеспечивает единство измерений спектральной зависимости и пространственного распределения показателя преломления твёрдых и жидких веществ в расширенном диапазоне длин волн 0,4–1,55 мкм за счёт использования 12 сменных источников излучения, динамического гониометра-спектрометра с кольцевым лазером и автоколлимационного нуля-индикатора. Выполнение высокоточных и достоверных рефрактометрических измерений является важным научным направлением, необходимым для повышения разрешающей способности объективов и других оптических приборов в оптической промышленности, а также для контроля качества и определения состава веществ в пищевой, химической и фармакологической промышленности.

Ключевые слова: показатель преломления, гониометр-спектрометр, рефрактометр, эталон

Для цитирования: Вишняков Г. Н., Минаев В. Л., Бочкарева С. С. Государственный первичный эталон единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021 // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 4–9. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-4-9>

State primary standard of refractive index GET 138-2021

Gennady N. Vishnyakov^{1✉}, Vladimir L. Minaev², Svetlana S. Bochkareva³

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

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

² HSE University, Moscow, Russia

¹vish@vniiofi.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-0237-4738>

²minaev@vniiofi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4356-301X>

³sbochkareva@vniiofi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1827-6075>

Abstract. State primary standard GET 138-2021 of refractive index, his structure, principle of work, and the metrological characteristics are presented. The modernized standard provides uniformity of measurements of the spectral dependence and spatial distribution of the refractive index of solid and liquid substances in the extended wavelength range from 0.4 to 1.55 microns. The standard GET 138-2021 includes a dynamic goniometer-spectrometer with a ring laser, an autocollimation null indicator and a set of 12 replaceable light sources in the form of laser modules with fiber output. High-precision and reliable refractometric measurements are necessary in the optical industry to increase the resolution of objectives and other optical devices. Also it is necessary to control the quality and composition of substances in the food, chemical and pharmacological industries.

Keywords: refractive index, goniometer-spectrometer, refractometer standard

Введение. Показатель преломления – это одна из важнейших характеристик вещества [1–3]. Раздел оптики, посвящённый методам и средствам измерений показателя преломления, называется рефрактометрией, а приборы для измерения показателя преломления – рефрактометрами. В настоящее время в Федеральном информационном фонде (ФИФ) по обеспечению единства измерений зарегистрировано 152

утверждённых типа рефрактометров. В 2021 г. по данным ФИФ в Российской Федерации проведено 9864 поверок рефрактометров.

Выполнение высокоточных и достоверных рефрактометрических измерений в оптической промышленности необходимо для повышения качества и надёжности оптических приборов, в химической промышленности – для контроля

состава веществ, топливно-энергетическому комплексу страны – для оперативного контроля чистоты топлива и анализа сложных углеводородных смесей в жидком и газообразном состоянии. Большое количество рефрактометров используется в пищевой промышленности при производстве сахара, соков, виноградного сусла, вина, спиртных напитков, пива и т. п. Фармакологические заводы, медицинские учреждения и аптеки также широко используют рефрактометры для анализа и контроля качества изготовления лекарственных препаратов.

Необходимость обеспечения единства измерений в области рефрактометрии обусловила создание первого государственного первичного эталона единицы показателя преломления (ГПЭ) и государственной поверочной схемы (ГПС) для средств измерений показателя преломления твёрдых и жидких сред в видимой области спектра, что было отражено в ГОСТ 8.487-83 «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений показателя преломления твёрдых и жидких веществ в видимой области спектра». В дальнейшем ГПЭ претерпел ряд модернизаций. До 2021 г. в соответствии с ГОСТ 8.583-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений показателя преломления» действовала ГПС для средств измерений показателя преломления, который возглавлял Государственный первичный эталон единицы показателя преломления ГЭТ 138-2010, разработанный во ВНИИОФИ [4].

Совершенствование ГЭТ 138-2010 в части обеспечения измерений спектральной зависимости показателя преломления обусловлено необходимостью измерений дисперсионных характеристик различных веществ, в первую очередь оптических стекол. Дисперсионные характеристики оптических стекол необходимы для расчёта прецизионной оптики с минимальными хроматическими аберрациями. Согласно ГОСТ 13659-78 «Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры» при производстве стекла для оптической промышленности необходимо измерять среднюю дисперсию, коэффициенты дисперсии, относительную частную дисперсии оптических стекол, что требует измерения спектральной зависимости показателя преломления. В результате появились новые средства измерений – спектральные рефрактометры, например ATR-L Multi Wavelength Spectroscopic Refractometer (Schmidt&Haensch, Германия), Abbemat MW (Anton-Paar, Австрия), спектрорефрактометры Аббе портативные ИРФ-479А, ИРФ-479Б (АО «Швабе – Технологическая лаборатория», г. Казань).

Расширение диапазона длин волн, на которых измеряется показатель преломления, в ближнюю инфракрасную область до 1,55 мкм обусловлено тем, что необходимо знать показатель преломления оптических материалов (кварца, кремния, германия и т. п.), которые используются при изготовлении оптических волокон, разработке инфракрасной оптики для тепловизоров, приборов ночного видения и других приборов специального назначения для оборонного комплекса страны.

Разработка новых оптических анализаторов волокон и их заготовок обусловила необходимость усовершенствования ГЭТ 138-2010 в части измерения пространственного распределения показателя преломления. В результате проведённого усовершенствования в 2021 г. утверждён Государственный первичный эталон единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021.

В данной работе описана часть ГЭТ 138-2021, предназначенная для воспроизведения, хранения и передачи единицы показателя преломления твёрдых и жидких веществ на разных длинах волн в диапазоне 0,4–1,55 мкм. Описание ГЭТ 138-2021 в части воспроизведения двумерного пространственного распределения (профиля) единицы показателя преломления, будет приведено в другой статье.

Состав и описание ГЭТ 138-2021. В состав ГЭТ 138-2021 входят:

- гониометр-спектрометр с кольцевым лазером для воспроизведения, хранения и передачи единицы показателя преломления твёрдых и жидких веществ;

- набор из 12 сменных источников излучения в диапазоне длин волн 405–1550 нм в виде лазерных модулей и He–Ne-лазера с волоконными выходами;

- эталонные меры показателя преломления в виде трёхгранных стеклянных призм из различных марок стекла и полый трёхгранной призмы с набором расходоуемых и возобновляемых рефрактометрических жидкостей;

- многоканальный цифровой термометр СА320 с выносными термометрами сопротивления на основе термистора;

- термогигрометр ИВА-6 для измерений температуры, атмосферного давления и влажности воздуха в зоне исследований;

- система сбора и обработки измерительной информации на базе персонального компьютера;

- специализированное программное обеспечение RefractiveIndexMeter.

В ГЭТ 138-2021 применяется так называемый метод призмы. Согласно методу призмы измерение показателя преломления основано на измерении угла наименьшего отклонения света при прохождении через оптически прозрачную трёхгранную призму. Известно, что при увеличении угла падения света на призму угол отклонения сначала уменьшается, а затем увеличивается, проходя через минимум. Если измерить этот угол наименьшего отклонения $\varepsilon_{\min}$, то относительный показатель преломления оптического материала призмы $n_{\text{отн}}$ можно вычислить по формуле Френеля [1–3]:

$$n_{\text{отн}}(\lambda, t) = \sin[(\alpha + \varepsilon_{\min}(\lambda, t))/2] / \sin(\alpha/2), \quad (1)$$

где α – преломляющий угол при вершине призмы; $\varepsilon_{\min}$ – угол наименьшего отклонения; λ – длина волны излучения; t – температура призмы в процессе измерений.

Для измерения показателя преломления жидких веществ используется специальная полая трёхгранная призма с плоскопараллельными прозрачными иллюминаторами.

В ГЭТ 138-2021 автоматическое измерение искомого угла наименьшего отклонения осуществляется с помощью

гонометра-спектрометра на основе динамического гонометра с кольцевым He-Ne-лазером. Кольцевой лазер создаёт угловую шкалу, точность которой определяется длиной волны лазерного излучения. Для реализации автоматического режима измерений методом наименьшего отклонения предложено использовать в составе гонометра-спектрометра двустороннее зеркало 2 (рис. 1), установленное на краю постоянно вращающейся платформы 3 в положении, при котором нормаль к зеркалу перпендикулярна оси вращения. Для привязки к отражающим поверхностям призмы в составе гонометра используется нуль-индикатор 1 на базе автоколлиматора, который производит импульсы в те моменты времени, когда его луч падает нормально к поверхностям двустороннего зеркала [5–7]. Трёхгранная стеклянная призма 5 устанавливается на поворотном оптическом столике 4, который механически не связан с непрерывно вращающейся платформой гонометра. Во время измерений поворотный столик и призма неподвижны. Между измерениями поворотный столик с призмой поворачивается с помощью шагового двигателя на некоторый угол. Первый сигнал с нуль-индикатора возникает при отражении луча от внешней по отношению к оси вращения зеркальной поверхности двустороннего зеркала 2 (положение *a*) и задаёт начало отсчёта угловых измерений. Второй сигнал возникает от луча, прошедшего через призму и отражённого назад от внутренней поверхности двустороннего зеркала 2 (положение *b*). Этот сигнал задаёт угол отклонения преломлённого луча по отношению к падающему лучу. Шаг по углу поворота призмы выбран одинаковым для всех измерений.

Для нахождения угла наименьшего отклонения $\varepsilon_{\min}$ в автоматическом режиме проводится серия измерений угла отклонения для различных угловых положений призмы, т. е. для различных углов падения. Предварительный поиск положения призмы, при котором угол отклонения близок к минимальному значению, осуществляется с помощью специально

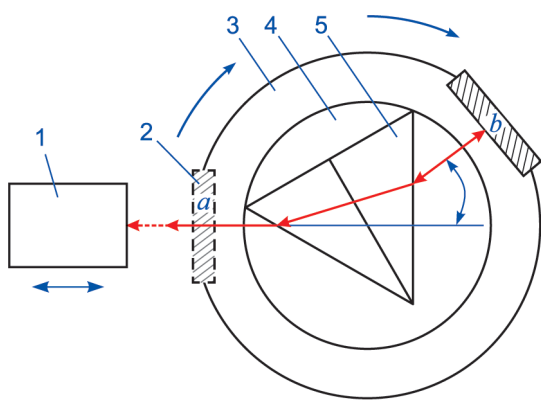


Рис. 1. Принципиальная схема динамического гонометра-спектрометра и схема измерения угла отклонения:

1 – нуль-индикатор; 2 – двустороннее зеркало (*a*, *b* – положения, соответственно, в начале отсчёта и при отражённом сигнале); 3 – вращающаяся платформа; 4 – поворотный оптический столик; 5 – призма

Fig. 1. Schematic diagram of a dynamic goniometer-spectrometer and a scheme for measuring the deflection angle:

1 – null indicator; 2 – two-side mirror (*a* – position at the origin, *b* – position with a reflected signal); 3 – rotating platform; 4 – rotary optical stage; 5 – prism

разработанного программного обеспечения RefractiveIndex Meter. После завершения предварительного поиска автоматически запускается процесс точного измерения зависимости угла отклонения от угла падения с последующей аппроксимацией полученной зависимости полиномом второй степени по девяти точкам измерений угла, по которой аналитически вычисляется минимальное значение $\varepsilon_{\min}$.

Из формулы Френеля (1) следует, что относительный показатель преломления измеряется косвенным способом и является функцией двух параметров – преломляющего угла призмы α и угла наименьшего отклонения $\varepsilon_{\min}$. Однако надо учитывать, что призма находится в воздухе, поэтому показатель преломления оптического материала призмы вычисляется относительно показателя преломления окружающего воздуха в рабочем пространстве эталона. Абсолютный показатель преломления материала призмы на длине волны λ вычислим по формуле

$$n_{\text{абс}}(\lambda, t) = n_{\text{отн}}(\lambda, t) N_{\text{в}}(t_{\text{в}}, p, f, \lambda), \quad (2)$$

где $n_{\text{отн}}(\lambda, t)$ – относительный показатель преломления на используемой длине волны λ при измеренной температуре призмы t ; $N_{\text{в}}$ – показатель преломления окружающего воздуха на той же длине волны λ при метеорологических параметрах атмосферного воздуха в рабочем пространстве эталона (температуре $t_{\text{в}}$, атмосферном давлении p , парциальном давлении f водяного пара в воздухе).

Измерения необходимо производить при нормальных условиях рабочего пространства эталона в соответствии с ГОСТ 8.050-73 «Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений». При отклонении температуры призмы от 20 °С больше, чем на 0,5 °С в процессе измерения, необходимо вводить поправку на температурный коэффициент $\beta_{\text{абс}}$ из каталога фирмы-производителя или по ГОСТ 13659-78 «Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры». В соответствии с ГОСТ 28869-90 «Материалы оптические. Методы измерений показателя преломления» абсолютный показатель преломления (2) пересчитывается в относительный показатель преломления $n(\lambda)$ материала призмы, но уже относительно показателя преломления воздуха $N_0(\lambda)$ при нормальных условиях ($t_{\text{в}} = 20$ °С; $p = 101,325$ кПа; $f = 1,33$ кПа), по формуле

$$n(\lambda) = [n_{\text{отн}}(\lambda, t) N_{\text{в}}(t_{\text{в}}, p, f, \lambda) - \beta_{\text{абс}}(t - 20^\circ)] / N_0(\lambda), \quad (3)$$

где $\beta_{\text{абс}}$ – температурный коэффициент.

Разработанное программное обеспечение RefractiveIndex Meter позволяет одновременно производить угловые измерения и фиксацию метеорологических параметров окружающей среды, а также расчёт текущего значения показателя преломления воздуха.

Устройства, входящие в состав ГЭТ 138-2021 и необходимые для измерения показателя преломления, представлены на рис. 2.

Основу гонометра-спектрометра составляет динамический гонометр ДГ-03Л, разработанный в Санкт-Петербургском

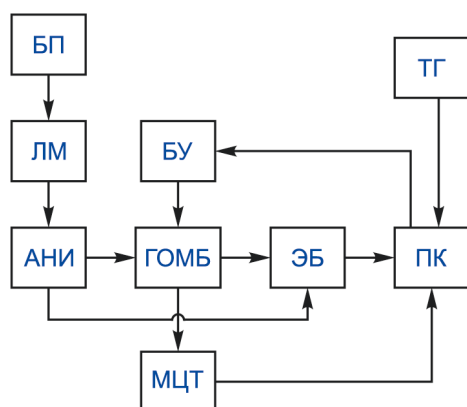


Рис. 2. Функциональная схема гониометра-спектрометра: БП – блок питания лазерных модулей; ЛМ – лазерные модули; АНИ – автоколлимационный нуль-индикатор; БУ – блок управления шаговым двигателем; ГОМБ – гониометр с оптико-механическим блоком; МЦТ – многоканальный цифровой термометр; ЭБ – электронный блок; ПК – персональный компьютер; ТГ – термогигрометр

Fig. 2. Functional diagram of the goniometer-spectrometer: PS – power supply unit for laser modules; LM – laser modules; ANI – autocollimation null-indicator; CU – stepper motor control unit; G – goniometer with optical-mechanical unit; MDT – multichannel digital thermometer; EU – electronic unit; PC – personal computer; TG – thermohygrometer

государственном электротехническом университете (ЛЭТИ). В гониометре нуль-индикатор выполнен в виде фотоэлектрического автоколлиматора, который формирует и направляет на двустороннее зеркало плоский пучок монохроматического света, а затем вырабатывает электрический сигнал в тот момент времени, когда отражённый назад световой пучок распространяется строго по направлению освещающего пучка света (рис. 3).

В качестве источников излучения в гониометре-спектрометре используются 11 лазерных диодных модулей с волоконным выходом (длины волн 405; 455; 520; 638; 660; 780; 850; 905; 1064; 1270; 1550 нм). Кроме лазерных модулей в качестве источника излучения дополнительно используется He–Ne-лазер (длина волны 632,8 нм) с волоконным выходом. Многоканальный цифровой термометр СА320 используется для измерения температуры эталонной призмы, а термогигрометр ИВА-6 предназначен для непрерывного измерения метеорологических параметров атмосферного воздуха внутри термокамеры.

Компьютер с программным обеспечением RefractiveIndex Meter выполняет расчёт искомого показателя преломления материала призмы, а также обеспечивает управление процессом измерения гониометром-спектрометром угла отклонения излучения при прохождении через призматическую меру показателя преломления, управляет поворотным оптическим столом с приводом от шагового двигателя, определяет угол наименьшего отклонения, фиксирует метеорологические данные окружающей эталон воздушной среды (рис. 4).

Результаты экспериментальных исследований ГЭТ 138-2021. Метрологические характеристики ГЭТ 138-2021 в части воспроизведения единицы показателя преломления исследовали путём измерения показателя преломления эталонных призм №№ 01, 02, 03 (стекло фирмы Schott, Германия), участвовавших

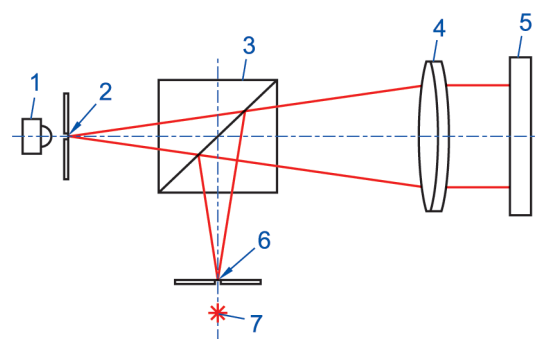


Рис. 3. Оптическая схема автоколлимационного нуль-индикатора: 1 – фотоприёмное устройство; 2 – выходная щель; 3 – светоделительный куб; 4 – объектив; 5 – двустороннее зеркало; 6 – входная щель; 7 – источник излучения

Fig. 3. Optical diagram of the autocollimation null-indicator: 1 – photodetector; 2 – exit slit; 3 – beam-splitting cube; 4 – lens; 5 – double-sided mirror; 6 – entrance slit; 7 – light source

Таблица 1

Результаты измерений показателя преломления для различных типов призм

Параметр	Длина волны, нм		
	455,96	632,8	1064
Призма № 01, марка стекла N-BAF 10			
n_{cp}	1,685454	1,667257	1,654238
СКО	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-7}$
U_p	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$
Призма № 02, марка стекла N-BK 7			
n_{cp}	1,525547	1,515361	1,507003
СКО	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
U_p	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$
Призма № 03, марка стекла SF-1			
n_{cp}	1,744005	1,712381	1,692621
СКО	$7,8 \cdot 10^{-7}$	$0,9 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
U_p	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$
Полая призма с дистиллированной водой			
n_{cp}	1,339159	1,331768	1,324093
СКО	$4,6 \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$
U_p	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2

Бюджет неопределённости при воспроизведении единицы показателя преломления

Неопределённость	Значение	Коэффициент чувствительности	Вклад в $u_c(n)$
$u_A(n)$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	–	–
$u_B(N_B)$	$8,2 \cdot 10^{-8}$	$\partial n / \partial N_B$	$1,2 \cdot 10^{-7}$
$u_B(t)$	0,001	$\partial n / \partial t$	$3,0 \cdot 10^{-9}$
$u_B(n_{отн})$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$\partial n / \partial n_{отн}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
$u_B(n)$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	–	–
$u_c(n)$			$1,4 \cdot 10^{-6}$

Блок-схема программы *RefractiveIndexMeter*
расчёта абсолютного показателя преломления

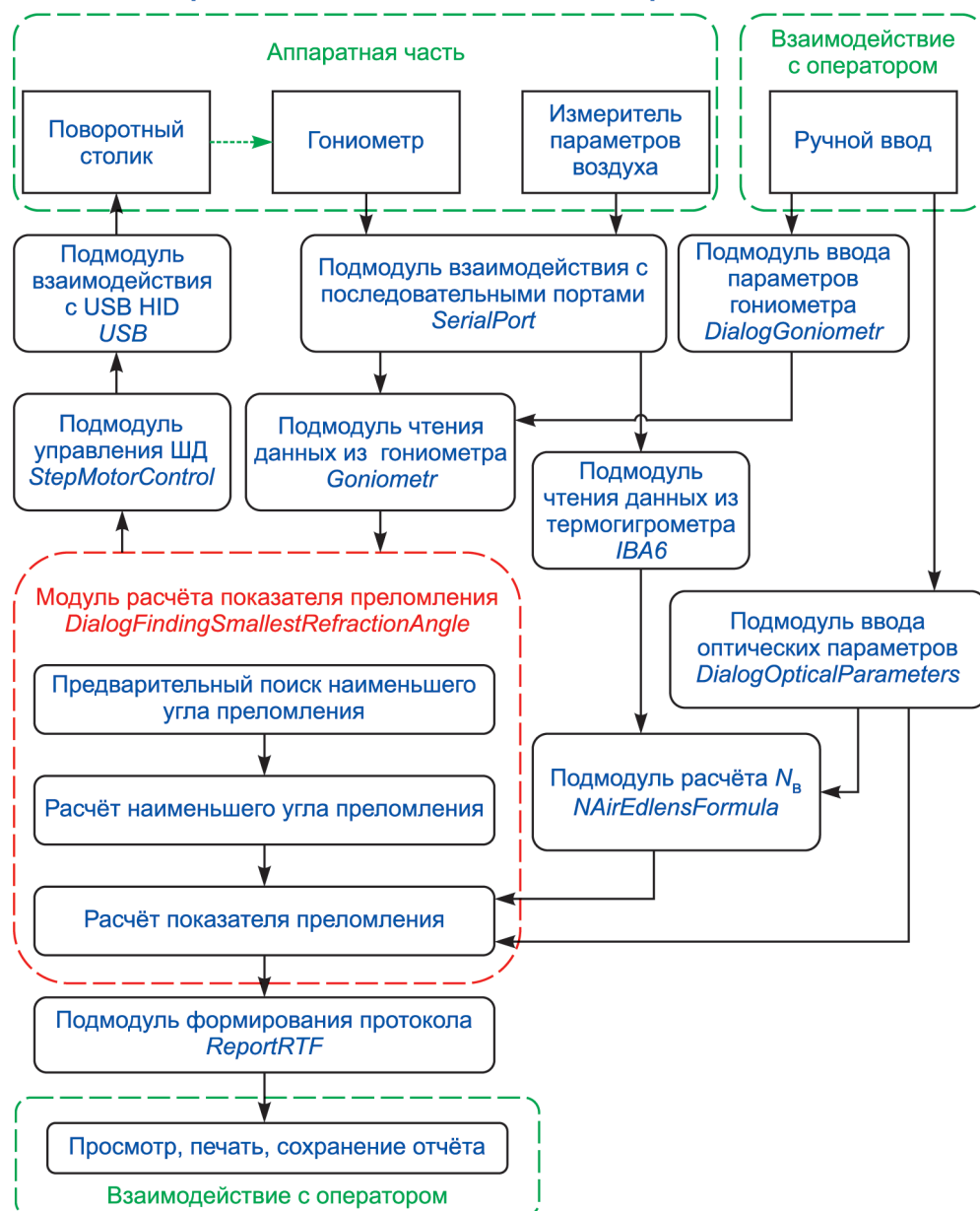


Рис. 4. Блок-схема работы программного комплекса *RefractiveIndexMeter*

Fig. 4. Block diagram of the operation of the software package *RefractiveIndexMeter*

в международных сличениях COOMET.PR-S3 [8], и полой призмы с дистиллированной водой на длинах волн 455; 633; 1064 нм. Полученные результаты измерений показателя преломления приведены к температуре 20 °С и нормальным атмосферным условиям (табл. 1), где n_{cp} – среднее арифметическое значение показателя преломления, СКО – среднее квадратическое отклонение; U_p – расширенная неопределённость при коэффициенте охвата $k=2$ и доверительной вероятности $P=0,95$.

Оценка бюджета неопределённости представлена в табл. 2, где $u_A(n)$, $u_B(n)$ – стандартные неопределённости, оценённые

Таблица 3

Результаты измерения показателя преломления n призмы № 02

λ , нм	n	СКО
405	1,530470	0,0000001
455	1,525547	0,0000001
520	1,520904	0,0000001
632,8	1,515361	0,0000001
638	1,515331	0,0000001
780	1,511507	0,0000007
850	1,510222	0,0000010
905	1,509254	0,0000008
1064	1,507011	0,0000005
1268,68	1,504342	0,0000010
1550,32	1,500859	0,0000004

соответственно по типам А, В; $u_c(n)$ – суммарная стандартная неопределённость. В расширенную неопределённость U_p воспроизведения единицы показателя преломления вносят вклад: температура призмы t , относительный показатель преломления призмы $n_{отн}(\lambda, t)$, показатель преломления воздуха $N_B(t_B, p, f, \lambda)$. Полученные значения $U_p=2u_c(n)$ не превышают $2,8 \cdot 10^{-6}$ при $k=2$ во всём диапазоне длин волн.

Для подтверждения возможности измерения показателя преломления в расширенном диапазоне длин волн 405–1550 нм с использованием программного обеспечения *RefractiveIndexMeter* измерен показатель преломления призмы № 02. Результаты приведены к нормальным значениям окружающего воздуха и температуре призмы 20 °С (табл. 3).

Таким образом, полученные результаты подтверждают расширенный диапазон длин волн, при этом СКО результатов измерений показателя преломления во всём диапазоне длин волн не превышает $1 \cdot 10^{-6}$.

По полученным данным найдём аналитическую зависимость показателя преломления от длины волны с помощью дисперсионной формулы Зельмейера:

$$n^2(\lambda)-1=\frac{K_1\lambda^2}{\lambda^2-L_1}+\frac{K_2\lambda^2}{\lambda^2-L_2}+\frac{K_3\lambda^2}{\lambda^2-L_3}, \quad (4)$$

где $K_1, L_1, K_2, L_2, K_3, L_3$ – коэффициенты, рассчитываемые с помощью программы *Zemax*.

При аппроксимации данных из табл. 1 получены следующие значения коэффициентов: $K_1=1,27, L_1=9,34 \cdot 10^{-3}, K_2=-3,58 \cdot 10^{-4}$,

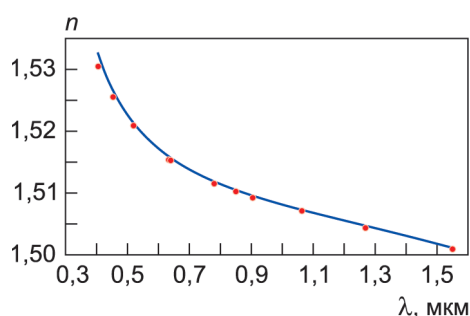


Рис. 5. Зависимость показателя преломления n призмы от длины волны λ излучения

Fig. 5. Graph of the dependence of the refractive index n of a prism on the wavelength λ

$L_2=1,46 \cdot 10^{-1}$, $K_3=1,08 \cdot 10^{-1}$, $L_3=14,0$. Используя полученные коэффициенты, по формуле (4) вычислим показатель преломления призмы № 02 на любой длине волны из диапазона 405–1550 нм. График зависимости $n(\lambda)$ приведён на рис. 5.

Кроме этого, используем полученную зависимость и вычислим такие важные дисперсионные характеристики стекла по ГОСТ 13659-78, как коэффициент дисперсии (число Аббе) ν_D и среднюю дисперсию $n_F - n_C$. Для этого с учётом коэффициентов, определённых по формуле (4), вычислим показатель преломления призмы № 02 на длинах волн 0,4861 нм (линия F), 0,5893 нм (линия D) и 0,6562 нм (линия C): $n_F=1,523672$; $n_D=1,517632$; $n_C=1,515094$. Отсюда $n_F - n_C=0,008578$ и $\nu_D=(n_D-1)/(n_F-n_C)=60,35$.

Закключение. В соответствии с приказом Минпромторга России от 1 февраля 2022 г. № 232 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений показателя преломления» ГЭТ 138-2021 входит в Государственную поверочную схему и является Государственным первичным эталоном единицы показателя преломления, который воспроизводит, хранит и передает единицу измерения рабочим эталонам 1-го и 2-го разрядов и далее средствам измерений. Использование гониометра-спектрометра с кольцевым лазером и расширение оптического диапазона излучения от 405 до 1550 нм значительно улучшает метрологические характеристики эталона, его калибровочные и измерительные возможности. ГЭТ 138-2021 и новая ГПС расширяют область измерений показателя преломления твёрдых и жидких веществ, что важно для оптической промышленности и производства оптического стекла, пищевой промышленности и производства продукции с определённым содержанием сахара или спирта, фармацевтической промышленности и изготовления лекарственных препаратов, топливно-энергетических комплексов и производства горюче-смазочных материалов.

Список источников

1. Tilton L. W., *Prism Refractometry and Certain Goniometrical Requirements for Precision (Classic Reprint)*, Forgotten Books, 2017.

2. Стороженко И. П., Тиманюк В. А., Животова Е. Н. Методы рефрактометрии и поляриметрии. Харьков: Изд-во НФаУ, 2012. 64 с.

3. Конопелько Л. А., Найденов А. С., Шур В. Л., Пинчук О. А., Колобова А. В., Кузьмин Б. П., Красавцев М. В. Рефрактометрические методы в физико-химических измерениях / под ред. Л. А. Конопелько. М.: Триумф, 2020. 208 с.

4. Вишняков Г. Н., Левин Г. Г., Корнышева С. В. Государственный первичный эталон единицы показателя преломления // Измерительная техника. 2004. № 11. С. 3–6.

5. 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. № 12. С. 53–58.

6. Вишняков Г. Н., Корнышева С. В. Обеспечение единства измерений в рефрактометрии твердых, жидких и газообразных веществ // Измерительная техника. 2005. № 11. С. 40–42.

7. Вишняков Г. Н., Корнышева С. В. Влияние качества изготовления оптических элементов на точность измерения показателя преломления гониометрическим методом // Метрология. 2011. № 12. С. 10–18.

8. Vishnyakov G. N., Fricke A., Parkhomenko N. M., Hori Y., Pisani M., *Metrologia*, 2016, vol. 53, 02001. <http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/53/1A/02001>

References

1. Tilton L. W., *Prism Refractometry and Certain Goniometrical Requirements for Precision (Classic Reprint)*, Forgotten Books, 2017.
2. Storozhenko I. P., Timanyuk V. A., Zhivotova E. N., *Metody refraktometrii i polarimetrii [Methods of refractometry and polarimetry]*, Khar'kov, Izd-vo NFAU Publ., 2012, 64 p. (In Russ.)
3. Konopel'ko L. A., Naidenov A. S., Shur V. L., Pinchuk O. A., Kolobova A. V., Kuz'min B. P., Krasavtsev M. V. *Refraktometricheskie metody v fiziko-khimicheskikh izmereniyakh [Refractometric methods in physical and chemical measurements]*, Ed. L. A. Konopel'ko, Moscow, Triumph publ., 2020, 208 p. (In Russ.)
4. 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>
5. 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>
6. Vishnyakov G. N., Kornysheva S. V., *Measurement Techniques*, 2005, vol. 48, no. 11, pp. 1099–1102. <https://doi.org/10.1007/s11018-006-0027-6>
7. Vishnyakov G. N., Kornysheva S. V., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 54, no. 12, pp. 1372–1377. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-9898-x>
8. Vishnyakov G. N., Fricke A., Parkhomenko N. M., Hori Y., Pisani M., *Metrologia*, 2016, vol. 53, 02001. <http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/53/1A/02001>

Статья поступила в редакцию 24.03.2022; одобрена после рецензирования 07.04.2022; принята к публикации 11.04.2022.
The article was submitted 24.03.2022; approved after reviewing 07.04.2022; accepted for publication 11.04.2022.

Научная статья

УДК 620.178.152.22

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-10-14>

Государственный первичный эталон твёрдости по шкалам Бринелля ГЭТ 33-2020

Андрей Эдуардович Асланян^{1✉}, Эдуард Георгиевич Асланян², Сергей Михайлович Гаврилкин³,
Александр Сергеевич Дойников⁴, Алексей Анатольевич Петухов⁵, Полина Валерьевна Сорокина⁶,
Андрей Николаевич Щипунов⁷, Лев Васильевич Юров⁸

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

¹andrey_aslanyan@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0239-3138>

²aslanyan@vniiftri.ru, ³gavrilkin@vniiftri.ru, ⁴doynikov@vniiftri.ru, ⁵petukhov@vniiftri.ru, ⁶psorokina@vniiftri.ru,

⁷ans@vniiftri.ru, ⁸lev@vniiftri.ru

Аннотация. Приведены результаты исследований и усовершенствования Государственного первичного специального эталона твёрдости по шкалам Бринелля ГЭТ 33-85. Эталон был усовершенствован во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) с 2018 по 2020 гг. с целью обеспечения единства измерений твёрдости по шкалам Бринелля. Расширен диапазон воспроизведения чисел твёрдости Бринелля, увеличено количество воспроизводимых эталоном шкал. Разработаны и созданы узлы эталона, обеспечивающие воспроизведение чисел твёрдости Бринелля в соответствии с современными международными требованиями. Утверждён Государственный первичный эталон твёрдости по шкалам Бринелля ГЭТ 33-2020. Исследованы метрологические характеристики ГЭТ 33-2020, составлен бюджет неопределённости измерений при воспроизведении чисел твёрдости по шкалам Бринелля. Средства измерений, прослеживаемые к ГЭТ 33-2020, применяются в металлургии, энергетике, аэрокосмической отрасли, станкостроении.

Ключевые слова: числа твёрдости Бринелля, государственный первичный эталон, бюджет неопределённости измерений, государственная поверочная схема

Для цитирования: 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 // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 10–14. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-10-14>

National primary standard machine on Brinell hardness scales GET 33-2020

Andrey E. Aslanyan^{1✉}, Edward G. Aslanyan², Sergey M. Gavrilkin³, Aleksandr S. Doynikov⁴,
Aleksey A. Petukhov⁵, Polina V. Sorokina⁶, Andrey N. Shchipunov⁷, Lev V. Yurov⁸

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region, Russia

¹andrey_aslanyan@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0239-3138>

²aslanyan@vniiftri.ru, ³gavrilkin@vniiftri.ru, ⁴doynikov@vniiftri.ru, ⁵petukhov@vniiftri.ru, ⁶psorokina@vniiftri.ru,

⁷ans@vniiftri.ru, ⁸lev@vniiftri.ru

Abstract. The results of research and improvement of the National primary standard machine on Brinell hardness scales GET 33-85 are presented. The standard was improved at the Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (VNIIFTRI) from 2018 to 2020 in order to ensure the uniformity of hardness measurements according to the Brinell scales. The range of reproduction of Brinell hardness numbers has been expanded, the number of reproducible scales by the standard has been increased. New standard nodes have been developed and created to ensure the reproduction of Brinell hardness numbers in accordance with modern international requirements. The State primary hardness Standard according to the Brinell scales GET 33-2020 has been approved. Metrological characteristics of GET 33-2020 were investigated, a budget of measurement uncertainty was compiled when reproducing hardness numbers according to the Brinell scales. Measuring instruments traceable to GET 33-2020 are used in metallurgy, energy, aerospace, machine tool industry.

Keywords: Brinell hardness numbers, State primary standard machine, budget of uncertainty, State hierarchy scheme

Введение. Информация о механических свойствах материалов, используемых при производстве изделий в аэрокосмической отрасли, машиностроении, судостроении, энергетике, металлургии промышленности, имеет критическое значение для создания высококачественной и высокотехно-

логичной продукции. Для изучения механических свойств материалов используют методы испытаний материалов на растяжение и сжатие. Однако данные методы требуют большого ресурса, их сложно реализовать на практике, а для некоторых образцов и невозможно. С целью устранения этих недостатков

в промышленности вследствие экономичности и относительной простоты реализации получили широкое распространение методы измерения твёрдости. Твёрдость является порядковой величиной, характеризующей материал и зависящей от способа воспроизведения величины. Порядковые величины согласно РМГ 29-2013 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения» и [1–3] могут входить только в эмпирические соотношения и не имеют ни единиц измерения, ни размерностей величин.

Метод Бринелля разработан в 1899–1900 гг. при исследовании влияния термообработки на текстуру прокатанной стали. Он заключается в том, что в исследуемый материал вдавливаются стальной или твердосплавный шариковый наконечник стандартизированной формы под действием нормированной силы. Наконечник находится под действием силы в течение нормированного времени. После прекращения действия силы вычисляют площадь поверхности восстановленного отпечатка. Твёрдость по Бринеллю определяют как отношение прикладываемой силы к площади поверхности восстановленного отпечатка.

Измерения твёрдости по методу Бринелля наиболее широко распространены при контроле процессов термообработки легированных и углеродистых конструкционных сталей. Числа твёрдости Бринелля являются показателем стабильности технических процессов штамповки. Данный метод получил распространение в результате простоты конструкции твердомеров, производительности измерений и низкой чувствительности к однородности измеряемого образца и окружающим условиям.

С 1979 г. по 1985 г. во ВНИИФТРИ разработан Государственный первичный специальный эталон единиц твёрдости по шкалам Бринелля. Метод Бринелля стандартизован (ГОСТ 9012-59 «Металлы. Измерение твёрдости по Бринеллю», ГОСТ 8.062-85 «ГСИ. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений твёрдости по шкалам Бринелля», ГОСТ 23677-79 «Твердомеры для металлов. Общие технические требования»).

Различными авторами выпущено большое число монографий и научных статей, в которых проанализирован метод Бринелля и средства измерений [4–13]. В 2014 г. опубликованы последние версии международных стандартов: ISO 6506-1:2014 “Metallic materials – Brinell hardness test – Part 1: Test method” и ISO 6506-3:2014 “Metallic materials – Brinell hardness test – Part 3: Calibrations of reference blocks”, описывающих метод измерения твёрдости по шкалам Бринелля и метод передачи чисел твёрдости Бринелля рабочим эталонам.

С появлением большого числа приборов, реализующих уточнённый метод Бринелля согласно ISO 6506-1:2014, возникла необходимость совершенствования ГЭТ 33-85 для обеспечения единства измерений твёрдости по шкалам Бринелля. В 2020 г. закончено усовершенствование ГЭТ 33-85. В состав модернизированного эталона вошли установки, воспроизводящие числа твёрдости по шкалам Бринелля, измерительный микроскоп. В результате выполненных мероприятий утверждён Государственный первичный эталон твёрдости по шкалам Бринелля ГЭТ 33-2020.

Метод воспроизведения чисел твёрдости Бринелля. Процесс воспроизведения чисел твёрдости по шкалам

Бринелля заключается во вдавливании стального или твердосплавного шарикового наконечника в меру твёрдости и определении диаметра восстановленного отпечатка после снятия прикладываемой нагрузки. Числа твёрдости по шкалам Бринелля определяются по формуле

$$HB(HBW) = \frac{0,202F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (1)$$

где F – сила, прикладываемая к наконечнику при вдавливании в материал; D – диаметр шарикового наконечника; d – диаметр отпечатка.

В методе Бринелля для каждой шкалы нормируется материал, из которого сделан наконечник, прикладываемые к наконечнику нагрузки, скорость подвода наконечника к мере твёрдости, время приложения силы, время выдержки силы. В современной трактовке метода Бринелля были уточнены параметры измерительного цикла (табл. 1).

Установки для воспроизведения чисел твёрдости по шкалам Бринелля представлены на рис. 1, 2. Установки представляют собой механизмы с грузами, с помощью которых обеспечивается непосредственное приложение силы к наконечнику при воспроизведении чисел твёрдости. В состав установок входят оптические системы, позволяющие измерять диаметры отпечатков. Оптическую систему 2 установки (см. рис. 1) используют для измерения диаметров отпечатков, полученных с помощью установок, изображённых на рис. 1, 2, б. Данная оптическая система предназначена для измерения всех возможных в методе Бринелля отпечатков. Установка (см. рис. 2, а) имеет встроенную оптическую систему, рассчитанную на измерения диаметров отпечатков не более 0,6 мм.

На рис. 1 представлена установка для воспроизведения чисел твёрдости Бринелля при прикладываемых к наконечнику усилиях в диапазоне 1838,8–29421 Н. В данной установке процесс воспроизведения приложения нагрузки к эталонной мере твёрдости и снятия нагрузки автоматизирован, что позволило реализовать метод Бринелля с уточнёнными требованиями. Для управления процессом нагружения разработано программное обеспечение [14], предназначенное для изменения и контроля всех параметров измерительного цикла. На рис. 2 представлены установки непосредственного нагружения при прикладываемых усилиях соответственно 49,04–1838,8 Н (рис. 2, б) и 9,807 Н (рис. 2, а). Данные установки введены в состав ГЭТ 33-2020 впервые.

На погрешность воспроизведения чисел твёрдости по шкалам Бринелля влияют отклонения от номинальных значений

Таблица 1

Нормируемые параметры цикла измерений методом Бринелля

Параметр	ГОСТ 9012-59	ISO 6506-3:2014
Время выдержки с нагрузкой, с	10–15	13–15
Время приложения нагрузки, с	2–8	6–8
Скорость наконечника перед контактом с образцом, мм/с	–	<1

силы и диаметра наконечника, время приложения и время выдержки силы, погрешности оптической системы.

В ГЭТ 33-2020 обеспечена прослеживаемость влияющих на воспроизведение чисел твёрдости величин к Государственному первичному эталону единицы силы ГЭТ 32-2011, Государственному первичному эталону единицы длины – метра ГЭТ 2-2010, Государственному первичному эталону единицы времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018, Государственному первичному специальному эталону единицы длины в области измерений параметров отклонений формы и расположения поверхностей вращения ГЭТ 136-2011.

Прослеживаемость прикладываемой силы к ГЭТ 32-2011 осуществлена с помощью рабочего эталона единицы силы 2-го разряда по приказу Росстандарта № 2498 от 22.10.2019 г. «Государственная поверочная схема для средств измерений силы».

Прослеживаемость измерений диаметров наконечников к ГЭТ 136-2011 выполнена с помощью контурографа. Пределы погрешности контурографа при измерении диаметра наконечника определяются выражением

$$\theta_{\text{кнт}} = \pm(0,2 + r \cdot 10^{-3}),$$

где $\theta_{\text{кнт}}$ – пределы погрешности контурографа в микрометрах; r – радиус наконечника в миллиметрах.

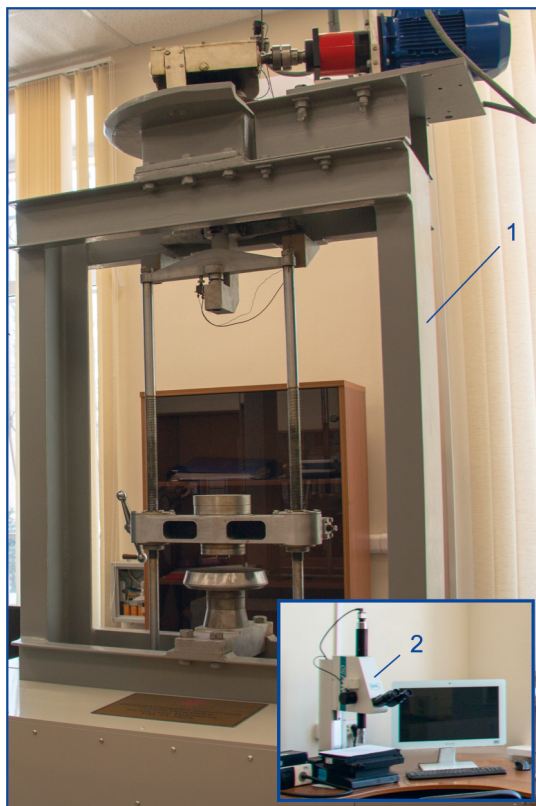


Рис. 1. Установка для воспроизведения чисел твёрдости Бринелля в диапазоне нагрузок 1838,8–29421 Н:

1 – установка непосредственного нагружения; 2 – оптическая система
Fig. 1. National primary standard machine on Brinell scales with loads for 1838.8 N to 29421 N:
1 – deadweight device; 2 – optical system

Прослеживаемость измерений диаметров отпечатков к ГЭТ 2-2010 осуществлена с помощью рабочего эталона длины 2-го разряда в соответствии с Приказом Росстандарта № 2840 от 29.12.2018 г. «Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 50 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм».

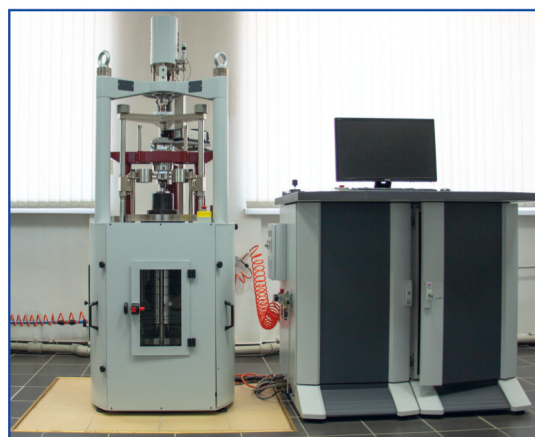
Прослеживаемость измерений времени приложения силы и времени выдержки силы к ГЭТ 1-2018 выполнена с применением осциллографа с пределами относительной погрешности измерения интервалов времени $\pm 5 \cdot 10^{-5}$.

Влияние отклонения прикладываемых сил к наконечнику, диаметров наконечников, погрешности оптической системы на воспроизведение чисел твёрдости определяли с помощью коэффициентов чувствительности, полученных дифференцированием уравнения (1) по переменным, обозначающим влияющие факторы (сила, диаметр наконечника, диаметр отпечатка).

Влияние временных параметров измерительного цикла исследовали экспериментально, определяя изменения воспроизводимых чисел твёрдости Бринелля при изменении одного из параметров измерительного цикла (времени приложения силы или времени выдержки силы) на 0,1 с.



а



б

Рис. 2. Установки для воспроизведения чисел твёрдости Бринелля в диапазонах нагрузок 49,04–1838,8 Н (а), 9,807 Н (б)

Fig. 2. National primary standard machine on Brinell scales with loads for 49.04 N to 1838.8 N (a), 9.807 N (b)

Результаты исследований ГЭТ 33-2020. В результате проведённых исследований систематических и случайных составляющих погрешностей воспроизведения чисел твёрдости по шкалам Бринелля определены границы неисклѐченной систематической погрешности θ (НСП) и среднее квадратическое отклонение S (СКО), обусловленные влияющими величинами. В табл. 2 показаны максимальные составляющие НСП и СКО воспроизведения чисел твёрдости из всего диапазона. Наибольший вклад в НСП и СКО вносят составляющие, обусловленные определением диаметра отпечатка. Шкалы твёрдости Бринелля являются шкалами порядка, поэтому СКО, НСП, неопределѐнность измерений при воспроизведении чисел твёрдости вычислены по модели линеаризации шкалы вблизи значений чисел.

Границы НСП воспроизведения чисел твёрдости с помощью ГЭТ 33-2020 при доверительной вероятности 0,99 рассчитывали по формуле

$$\theta_{\text{НВ}} = \pm 1,4 \sqrt{\sum (C_i \theta_i)^2};$$

где C_i , θ_i – коэффициент чувствительности и границы НСП i -й влияющей величины соответственно.

Коэффициенты чувствительности влияющих величин, входящих в уравнение (1), определяли дифференцированием уравнения (1) по влияющей величине. Коэффициенты чувствительности величин, не входящих в уравнение (1), находили экспериментально.

СКО воспроизведения чисел твёрдости Бринелля вычисляли как

$$S_{\text{НВ}} = \sqrt{\sum (C_i S_i)^2},$$

где S_i – СКО результата измерений i -й величины.

В табл. 3 представлены метрологические характеристики ГЭТ 33-85 и ГЭТ 33-2020. В табл. 3 использованы следующие обозначения: Δ – диапазон воспроизведения чисел твёрдости по шкалам Бринелля; N – количество шкал Бринелля; θ – границы НСП воспроизведения чисел твёрдости по шкалам Бринелля; S – СКО воспроизведения чисел твёрдости по шкалам Бринелля, количество независимых измерений $n=10$ для ГЭТ 33-85 и $n=5$ для ГЭТ 33-2020; u_A – стандартная неопределѐнность измерений по шкалам Бринелля НВ и НВW по типу А, количество независимых измерений $n=10$ для ГЭТ 33-85 и $n=5$ для ГЭТ 33-2020; u_B – стандартная неопределѐнность измерений по шкалам Бринелля НВ и НВW по типу В; u_c – суммарная стандартная неопределѐнность измерений по шкалам Бринелля НВ и НВW; U – расширенная неопределѐнность измерений ($k=2$) по шкалам Бринелля НВ и НВW.

Одновременно с утверждением ГЭТ 33-2020 разработан проект государственной поверочной схемы. Передача чисел твёрдости Бринелля от ГЭТ 33-2020 осуществляется методом прямых измерений твёрдости рабочего эталона 1-го разряда по шкалам Бринелля (эталонной меры твёрдости первого разряда). От рабочего эталона 1-го разряда числа твёрдости Бринелля передаются методом сравнения с помощью компаратора рабочему эталону 2-го разряда по шкалам Бринелля (эталонной мере твёрдости 2-го разряда). От рабочего эталона

Таблица 2

Составляющие НСП и СКО воспроизведения чисел твёрдости по шкалам Бринелля

Влияющие величины	$\theta_{\text{НВ}}$	$\theta_{\text{НВW}}$	$S_{\text{НВ}}$	$S_{\text{НВW}}$
Диаметр отпечатка	$\pm 0,5$	$\pm 0,9$	0,7	1,0
Прикладываемая сила	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	0,08	0,02
Диаметр наконечника	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	0,007	0,0008
Время выдержки силы	$\pm 0,002$	$\pm 0,002$	0,0002	0,0001
Время приложения силы	$\pm 0,003$	$\pm 0,004$	0,0002	0,0003

Таблица 3

Метрологические характеристики ГЭТ 33-85 и ГЭТ 33-2020

Характеристика	ГЭТ 33-85	ГЭТ 33-2020
$\Delta_{\text{НВ}}$	8–450	5–450
$\Delta_{\text{НВW}}$	8–650	5–650
$N_{\text{НВ}}$, шт.	9	19
$N_{\text{НВW}}$, шт.	9	20
$\theta_{\text{НВ}}$	$\pm 0,3 \dots \pm 1,5$	$\pm 0,3 \dots \pm 1,1$
$\theta_{\text{НВW}}$	$\pm 0,3 \dots \pm 2,1$	$\pm 0,3 \dots \pm 1,6$
$S_{\text{НВ}}$	0,1–0,5	0,2–0,7
$S_{\text{НВW}}$	0,1–0,7	0,2–1,0
$u_{\text{А НВ}}$	0,1–0,5	0,2–0,7
$u_{\text{В НВ}}$	0,1–1,7	0,1–0,4
$u_{\text{А НВW}}$	0,1–0,7	0,2–1,0
$u_{\text{В НВW}}$	–	0,1–0,6
$u_{\text{с НВ}}$	0,25–1,8	0,25–0,8
$u_{\text{с НВW}}$	0,25–2,6	0,25–1,1
$U_{\text{НВ}}$	0,5–3,6	0,5–1,6
$U_{\text{НВW}}$	0,5–5,2	0,5–2,2

2-го разряда методом прямых измерений числа твёрдости передаются средствам измерений – твердомерам Бринелля.

Заклучение. ГЭТ 33-2020 обеспечивает единство измерений твёрдости по шкалам Бринелля. Введение новых установок в состав ГЭТ 33-2020 позволило увеличить количество воспроизводимых шкал твёрдости Бринелля. В результате автоматизации эталонной установки для воспроизведения чисел твёрдости Бринелля в диапазоне нагрузок 1838,8–29421 Н и введения новых эталонных установок ГЭТ 33-2020 воспроизводит числа твёрдости Бринелля в соответствии с современными международными требованиями ISO 6506-1:2014 и ISO 6506-3:2014. Метрологические характеристики ГЭТ 33-2020 соответствуют уровню измерительных возможностей ведущих промышленно развитых стран мира.

Список источников

1. Дойников А. С. Измеряемая величина // Большая российская энциклопедия. 2016. URL: <https://bigenc.ru/physics/text/2002348> (дата обращения: 18.03.2022).
2. Дойников А. С. Измеряемое свойство // Большая российская энциклопедия. 2016. URL: <https://bigenc.ru/physics/text/2002364> (дата обращения: 18.03.2022).
3. Дойников А. С. Лекции по метрологии. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018. 292 с.

4. Yukimi Tanaka, Yutaka Seino, Koichiro Hattori, *Measurement Science and Technology*, 2019, vol. 30, no. 6, 065012. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab150f>

5. Ma L., Low S., Song J., An approach to determining the Brinell hardness indentation diameter based on contact position, *XX IMEKO World Congress Metrology for Green Growth*, September 9–14, 2012, Busan, Republic of Korea, pp. 308–312.

6. Herrmann K., *Hardness Testing Principles and Applications. Brinell ISO 6506 and ASTM E10 Procedures*, ASM International, Novato, USA, 2011, pp. 52–61.

7. Alessandro Germak, Claudio Origlia, Analysis and estimation of possible large systematic error in Brinell hardness measurements, *HARDMEKO 2007 Recent Advancement of Theory and Practice in Hardness Measurement*, 19–21 November, 2007, Tsukuba, Japan, pp. 76–80.

8. Martins A. R., Paciornik S., Pereira J. A. S., Brinell hardness: image analysis and uncertainty, *XVI IMEKO World Congress Measurement – Supports Science – Improves Technology – Protects Environment and Provides Employment – Now and in the Future*, Vienna, Austria, 2000, September 25–28.

9. Machado R. R., Azeredo C. R., Souza M. M., Frade F. C., Costa P. B., Comparison of Brinell measurement systems on the edge indents identification, *IMEKO 23rd TC3, 13th TC5 and 4th TC22 International Conference* 30 May to 1 June, 2017, Helsinki, Finland, pp. 304–307.

10. Machado R. R., Oliveira S. P., Koch C. A., Silva I. D., Muniz B. C. O., Influence of different numerical apertures on hardness values using an automatic system of measurement, *HARDMEKO 2007 Recent Advancement of Theory and Practice in Hardness Measurement*, 19–21 November, 2007, Tsukuba, Japan, pp. 71–75.

11. Koichiro Hattori, Takashi Usuda, Primary hardness standard of Brinell hardness in Japan, *XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development*, September, 17–22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil.

12. Aslanyan A., Aslanyan E., Oboznyi E., Galat E., Dovzhenko Y., Zhamanbalin M., *Metrologia*, 2020, vol. 57, no. 1A, 07003. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/57/1a/07003>

13. Асланян А. Э. Региональные сличения национальных первичных эталонов твёрдости по шкалам Виккерса и Бринелля // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 21–24. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-21-24>

14. Программа для ЭВМ № RU 2021669102 / Петухов А. А. // Программы для ЭВМ. Базы данных. ТИМС. 2021. № 12.

References

1. Doynikov A. S., *Izmeriyemaya velichina, Bol'shaya Rossiyskaya Enciklopediya*, 2016, available at: <https://bigenc.ru/physics/text/2002348> (accessed: 18.03.2022). (In Russ.)

2. Doynikov A. S., *Izmeriyemoe svoystvo, Bol'shaya Rossiyskaya enciklopediya*, 2016, available at: <https://bigenc.ru/physics/text/2002364> (accessed: 18.03.2022). (In Russ.)

3. Doynikov A. S., *Lekcii po metrologii*. Mendeleevo, FSUE "VNIIFTRI" Publ., 2018, 292 p. (In Russ.)

4. Yukimi Tanaka, Yutaka Seino, Koichiro Hattori, *Measurement Science and Technology*, 2019, vol. 30, no. 6, 065012. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab150f>

5. Ma L., Low S., Song J., An approach to determining the Brinell hardness indentation diameter based on contact position, *XX IMEKO World Congress Metrology for Green Growth*, September 9–14, 2012, Busan, Republic of Korea, pp. 308–312.

6. Herrmann K., *Hardness Testing Principles and Applications. Brinell ISO 6506 and ASTM E10 Procedures*, ASM International, Novato, USA, 2011, pp. 52–61.

7. Alessandro Germak, Claudio Origlia, Analysis and estimation of possible large systematic error in Brinell hardness measurements, *HARDMEKO 2007 Recent Advancement of Theory and Practice in Hardness Measurement*, 19–21 November, 2007, Tsukuba, Japan, pp. 76–80.

8. Martins A. R., Paciornik S., Pereira J. A. S., Brinell hardness: image analysis and uncertainty, *XVI IMEKO World Congress Measurement – Supports Science – Improves Technology – Protects Environment and Provides Employment – Now and in the Future*, Vienna, Austria, 2000, September 25–28.

9. Machado R. R., Azeredo C. R., Souza M. M., Frade F. C., Costa P. B., Comparison of Brinell measurement systems on the edge indents identification, *IMEKO 23rd TC3, 13th TC5 and 4th TC22 International Conference* 30 May to 1 June, 2017, Helsinki, Finland, pp. 304–307.

10. Machado R. R., Oliveira S. P., Koch C. A., Silva I. D., Muniz B. C. O., Influence of different numerical apertures on hardness values using an automatic system of measurement, *HARDMEKO 2007 Recent Advancement of Theory and Practice in Hardness Measurement*, 19–21 November, 2007, Tsukuba, Japan, pp. 71–75.

11. Koichiro Hattori, Takashi Usuda, Primary hardness standard of Brinell hardness in Japan, *XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development*, September, 17–22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil.

12. Aslanyan A., Aslanyan E., Oboznyi E., Galat E., Dovzhenko Y., Zhamanbalin M., *Metrologia*, 2020, vol. 57, no. 1A, 07003. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/57/1a/07003>

13. Aslanyan A. E., 2021, *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 8, pp. 628–632. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01982-6>

14. Petukhov A. A., Computer program no. RU 2021669102, Computer Programs, Databases, TIC, no. 12 (2021).

Статья поступила в редакцию 04.04.2022; одобрена после рецензирования 11.04.2022; принята к публикации 12.04.2022. The article was submitted 04.04.2021; approved after reviewing 11.04.2022; accepted for publication 12.4.2022.

Измерения и вычисления – предмет современной метрологии

Сергей Фёдорович Левин

Московский институт экспертизы и испытаний, Москва, Россия, miei-metrolog@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема синонимии измерений и вычислений, длительное время препятствовавшая должной нормативно-методической проработке вопросов неадекватности для математических моделей объектов измерений – одной из важнейших проблем метрологии. Концептуально решение проблемы неадекватности при идентификации математических моделей по данным совместных измерений связано с переходом от синонимии измерений и вычислений к принципу единства результатов измерений и результатов вычислений. Дана краткая характеристика тематики Всесоюзной дискуссии по проблемам применимости вероятностно-статистических методов 1970–1990 гг., инициированной вопросом А. Н. Колмогорова об объективном смысле вероятности. Обращено внимание на то, что в ходе дискуссии критике подверглись математические результаты, составившие впоследствии основу «Руководства по выражению неопределённости измерения» и его приложений. Проанализированы основные результаты математики как универсального языка науки, связанные с решением измерительных задач, расширяющих представление о предмете метрологии. Показано, что с этой точки зрения современная метрология представляет собой фундаментальную науку о методах и средствах отображения свойств объектов измерений математическими моделями. Простейшими моделями являются величины и распределения значений, а более сложными – случайные функции, функционалы и операторы. К средствам отображения, кроме средств измерений, отнесены средства вычислений с математическим, алгоритмическим и программным обеспечением для решения измерительных задач. Отмечена связь с проблемой неадекватности сложностей, возникающих в подготовке и повышении квалификации специалистов-метрологов.

Ключевые слова: измерение, метод измерения, измерительная задача, метод решения измерительной задачи, погрешность неадекватности, распределение вероятностей, композиция, свёртка

Для цитирования: Левин С. Ф. Измерения и вычисления – предмет современной метрологии // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 15–21. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-15-21>

Measurements and calculations are the subject of modern metrology

Sergey F. Levin

Moscow Institute for Expertise and Tests, Moscow, Russia, miei-metrolog@yandex.ru

Abstract. The problem of synonymy of measurements and calculations is considered, which for a long time prevented the proper normative and methodological elaboration of the issues of inadequacy for mathematical models of measurement objects – one of the most important problems of metrology. Conceptually, the solution to the problem of inadequacy in identifying mathematical models based on joint measurements is associated with the transition from synonymy of measurements and calculations to the principle of unity of measurement results and calculation results. A brief description of the topics of the All-Union discussion on the applicability of probabilistic and statistical methods of the 1970–1990s, initiated by A. N. Kolmogorov's question about the objective meaning of probability, is given. Attention is drawn to the fact that during the discussion the mathematical results were criticized, which later formed the basis of the "Guide to the expression of measurement uncertainty" and its applications. The main results of mathematics as a universal language of science related to the solution of measurement problems that expand the understanding of the subject of metrology are analyzed. From this point of view, modern metrology is a fundamental science of methods and means of displaying the properties of measurement objects by mathematical models. The simplest of them are quantities and distributions of values, and the more complex ones are random functions, functionals and operators. The means of selection, in addition to measuring instruments, include computing tools with mathematical, algorithmic and software for solving measurement problems. The connection with the problem of inadequacy of difficulties arising in the training and advanced training of metrologists is noted.

Keywords: measurement, measurement method, measurement problem, method of solving the measurement problem, error of inadequacy, probability distribution, composition, convolution

Введение. Центральным технологическим событием метрологии XX в. стало начало широкого внедрения вычислительной техники. К этому времени понятия «измерение» и «вычисление» всё ещё воспринимались как нечто большее, чем синонимы, несмотря на различие физической природы соответствующих им операций, но благодаря совпадению числовых форм результатов. На сочетание *реального*

(физического) и *идеального* (математического) в измерении в 1938 г. обратил внимание А. Лебег в книге [1]: «геометрическое измерение начинается как **физический** процесс и имеет **метафизическое** продолжение». В предисловии к [1] А. Н. Колмогоров уточнил: «в геометрических измерениях условие сохранения физического смысла математических операций с величинами на метрических шкалах есть **гомоморфизм**.

Система аксиом, лежащих в основе геометрии, является замечательным, концентрированным выражением наших усилий, направленных к познанию действительности».

Другими словами, языку чисел для описания объективной реальности надо учиться, опираясь на физический смысл математических действий с величинами. Но именно искажение прямого смысла слова «измерение» в названиях так называемых «непрямых измерений» – косвенных, совокупных и совместных – причина того, что длительное время без должной нормативно-методической проработки оставалась неадекватность математических моделей объектов измерений.

Показательно, если в МИ 1967-89 «ГСИ. Выбор методов и средств измерений при разработке методик выполнения измерений. Общие положения» отмечалось, что «способы определения методической погрешности измерений, обусловленной неадекватностью принятой модели объекта измерений, относятся к наименее развитым областям метрологии», то в МИ 2091-90 «ГСИ. Измерения физических величин. Общие требования» появилась норма: «погрешность, обусловленная несоответствием модели объекту измерений, не должна превышать 10 % от предела допускаемой погрешности измерений».

Привязка понятия «неадекватности» к погрешности измерения была связана с отсутствием термина «погрешность неадекватности» и его количественного определения в нормативных документах Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) до 1998 г. Правда, количественная мера неадекватности в виде статистического распределения или распределения вероятностей (функции компактности [2]) фактически применялась в методе максимума компактности (ММК) в теории обеспечения эксплуатации технических объектов, к надёжности которых предъявлялись повышенные требования. В метрологии же функция компактности нашла применение в Руководящем материале ВНИИМИСП¹ – РМ-88 «Методика назначения сроков очередной аттестации и поверки средств измерений высшей точности в приборостроении».

Термин «погрешность неадекватности» сформировался в ходе Всесоюзной дискуссии по проблемам применимости вероятностно-статистических методов, которая вначале проходила заочно [2–8], а затем продолжилась на Всесоюзном научно-техническом семинаре «Статистическая идентификация, прогнозирование и контроль» [9–12], причём материалом дискуссии стали и работы зарубежных авторов [13–21].

Дискуссия была инициирована вопросом А. Н. Колмогорова об объективном смысле вероятности [22]. Его в ходе дискуссии дополнила Е. С. Вентцель: «на теорию вероятностей нередко смотрят как на своего рода волшебную палочку, позволяющую получать информацию из полного незнания» [23]. Принципиальным стало уточнение ведущих специалистов в области теории планирования эксперимента Ю. П. Адлера, Ю. В. Грановского и Е. В. Марковой: «проверка

адекватности оказывается единственным критерием годности моделей. Все стройное здание построения математической модели может рухнуть, если не выполняются исходные предпосылки, лежащие в основе статистического анализа, такие, как предпосылки о виде законов распределения, однородности дисперсий и т. д.» [24]. Началась же дискуссия научно-методическими замечаниями В. Н. Тутубалина к краткому курсу теории вероятностей [25].

В ходе дискуссии критике в первую очередь подверглись так называемая «нормальная теория», ГОСТ 8.207-76 «ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения», а также субъективная и частотная концепции вероятности в совокупности с предельными теоремами теории вероятностей. Предметами критики также стали датчики псевдослучайных чисел, дисперсионный анализ, устойчивость статистических оценок и критерии проверки гипотез. Особой критике было подвергнуто определение адекватности математических моделей по ГОСТ 24026-80 «Планирование эксперимента. Термины и определения», связанное с принимаемым критерием адекватности, как правило, критерием Фишера.

В конце 1980-х гг. были отменены 24 стандарта по статистическим методам из 31 и аннулированы стандарты по прикладной статистике.

В сложившейся ситуации вследствие появления различного рода «современных курсов», «современных методов» или «современных подходов» и т. п., сформировался **вопрос о предмете современной метрологии как науки**. Метрология – наука консервативная, и её обычно рассматривают как науку об измерениях, о методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Но, строго говоря, необходимо уточнять, о каких именно измерениях, методах и средствах, о каком единстве идёт речь, и, главное, какие задачи решает метрология. Известно и то, что метрология немыслима без математики, которая выражает коллективный опыт человечества, полученный при познании многообразия физической реальности как единого целого.

Цель настоящей статьи – рассмотреть предмет метрологии с точки зрения определивших её развитие математических результатов.

Предыстория вопроса. Открытие в VI в. до н. э. Пифагором Самосским несоизмеримых отрезков вызвало первый в истории математики кризис. Появились теория иррациональных величин Таэтета Афинского и учение о несоизмеримости Евдокса Книдского, разработавшего в IV в. до н. э. научную основу геометрии – аксиоматику понятия величины. Её обобщил Евклид Александрийский и дополнил аксиомой измеримости в III в. до н. э. Архимед Сиракузский [26]. Понятие же действительного числа было сформулировано только в 1707 г. И. Ньютоном в «Универсальной арифметике»: «Число есть не столько совокупность нескольких единиц, сколько отвлечённое отношение какой-нибудь величины к другой, однородной с ней и принятой за единицу. Число бывает трёх видов: целое, дробное и иррациональное.

¹ ВНИИМИСП – Всесоюзный НИИ метрологии, испытаний и стандартизации в приборостроении.

Целое есть то, что измеряется единицей; дробное – кратное долей единицей; иррациональное число несоизмеримо с единицей». В 1768 г. Л. Эйлер уточнил в «Алгебре»: «При определении или измерении величин всякого рода устанавливается некоторая известная величина этого же рода, именуемая мерой или единицей и зависящая исключительно от нашего произвола. Затем определяется, в каком отношении находится данная величина к этой мере, что всегда выражается через числа, так что число является не чем иным, как отношением, в котором одна величина находится к другой, принятой за единицу». Меры дольных и кратных единиц при построении шкал измерений могут быть получены калибровкой. Аксиоматике системы действительных чисел придан законченный вид аксиомой непрерывности Р. Дедекинда накануне принятия Метрической конвенции. В итоге полнота выполнения аксиом определила классификацию шкал измерений, а их спецификацию – способ калибровки соответствующей системы мер. Создание дифференциального и интегрального исчисления к концу XVII в. И. Ньютоном и Г. Лейбницем [27] дополнило аппарат математического отображения объектов измерений операторными моделями.

Накопленный в астрономии за две с половиной тысячи лет опыт построения математических моделей «системы мира» сформировал понятие *точности* как совпадения расчётных предсказаний модели с измеренным положением небесного светила. Или, другими словами, как совпадения результата вычислений с результатом измерений. Расхождение выражали ошибкой или погрешностью – *числом*. А на рубеже XVIII–XIX вв. благодаря работам по теории вероятностей стало формироваться представление о расхождении результатов вычислений и измерений «с точностью до *распределения вероятностей*».

Проблема неадекватности первоначально была сформулирована количественно в задаче прогнозирования надёжности технических объектов и решена в начале 1980-х гг. в схеме перекрёстного наблюдения *распределением погрешностей предсказания надёжности*, удовлетворяющем требованию компактности [7, с. 187] – методом максимума компактности (ММК) [28].

Проблема неадекватности с точки зрения неполноты описания «уравнения измерения» рассматривалась и в Приложении D [29]. Её решением могла бы стать метрологическая аттестация, но ни математического определения «собственной» неопределённости, «которую, в принципе, можно оценить тем или иным способом» [29, D.3.4, с. 47], ни «того или иного способа» её оценивания указано не было. Позже в Международном словаре 2007 г. [30] эта неопределённость получила название «дефиниционной», была связана с понятием *детализации* и полагалась как «пренебрежимо малая по сравнению с другими составляющими неопределённости измерений». Однако в примечании 2 к [29, D.3.4] всё-таки было отмечено, что «это не всегда будет практично».

Заметим, *детализация* неполного «уравнения измерения» предполагает его усложнение включением дополнительных переменных [29]. Перебор же кодов структуры математической модели и «подробность моделирования» в ММК

допускает также упрощение и, самое главное, существование модели оптимальной сложности для достигнутого уровня точности измерений [28].

Вместе с тем некоторые ведущие метрологи восприняли появление концепции неопределённости измерения как новый этап развития метрологии, и их усилия фактически вылились в терминологический гудок при полном отсутствии каких-либо математических результатов в отношении «неопределённости измерения». Поэтому не удивительно, что после перевода [31] на русский язык и внедрения в отечественную метрологию оригинальной терминологии [29] возник проект кардинальной ревизии [32], который ещё больше скомпрометировал концепцию неопределённости измерения в целом [33].

Актуальные для метрологии математические результаты. Ответ на *вопрос о предмете современной метрологии как науки* даёт анализ хронологии математических результатов, составляющих арсенал методов и средств метрологии для решения измерительных задач и приведенных ниже.

1738 г. – нормальное распределение как предел биномиального распределения при $p=1/2$ [34].

1792 г. – метод наименьших модулей [35].

1794 г. – метод наименьших квадратов (МНК) [36, 37].

Оба метода до сих пор используются в статистических измерительных задачах, причём в силу простоты вычислительной схемы более широко распространён МНК.

1834 г. – *композиция* как функциональное преобразование распределений вероятностей [38] (для линейных моделей она вырождается в свёртку), что стало основой *композиционного подхода* к оцениванию точности.

1894 г. – метод моментов [39]. Оценивание точности решений измерительных задач на основе этого метода получило название моментного подхода. Метод получил широкое распространение благодаря простоте.

1853 г. – теория наилучшего приближения непрерывных функций [40].

1901 г. – центральная предельная теорема теории вероятностей [41]. Теоретическое обоснование «нормального закона» (распределения Гаусса) как предельного соотношения для среднего арифметического при неограниченном увеличении объёма выборки в неизменных условиях измерений.

1914 г. – предпочтительность среднего абсолютного отклонения (САО) перед средним квадратическим отклонением (СКО). Точка зрения А. С. Эддингтона: «Хотя это входит в противоречие с рекомендацией большинства учебников, как нетрудно показать, правильнее пользоваться именно ею» [42, р. 147].

1925 г. – формула обращения для характеристических функций $\chi(t)$ [43]:

$$\frac{F(x+h)-F(x-h)}{2h} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(ht)}{ht} e^{-itx} \chi(t) dt,$$

где функция распределения вероятностей $F(x)$ непрерывна в точках $x \pm h$. Формула обращения представляет собой свёртку для суммы независимых случайных величин с распределением $F(x)$ и равномерным распределением на интервале

$[-h, +h]$. Её практическое использование сначала ограничивалось нормальным законом при $h \ll \sigma$, где σ – стандартное отклонение этого закона, когда свёртка «мало отличается от нормальной кривой с дисперсией, равной сумме дисперсий компонент» [44, с. 190], или $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma^2 + h^2/3}$.

1933 г. – первый прорыв в непараметрической статистике (по выражению Ю. Неймана [18, с. 6]), теорема А. Н. Колмогорова о предельном поведении наибольшего отклонения эмпирической функции распределения от теоретической, называемого статистикой или расстоянием Колмогорова [45, с. 134]:

$$D_* = \sup_{|x| < \infty} |F_{(N)}(x) - F_*(x)|.$$

1942–1945 гг. – оценка вероятности для доли γ неизвестного распределения на размахе вариационного ряда из N членов по крайним порядковым статистикам:

$$\beta = P\{\hat{\xi}_{(1)} \leq \Xi \leq \hat{\xi}_{(N)}\} = 1 - N\gamma^{N-1} + (N-1)\gamma^N,$$

где $0 < \gamma < 1$ [46–48]. При доверительной вероятности $P = \gamma = \{0,90; 0,95; 0,99\}$ объём N выборок, необходимых согласно ГОСТ Р 50779.29-2017 «Статистические методы. Статистическое представление данных. Определение статистических толерантных интервалов» для подтверждения заданного значения P для непрерывных распределений составляет $N = \{38; 93; 662\}$, а при достоверных сведениях об их симметричности – $N_v = \{11; 29; 228\}$.

1945 г. – второй прорыв в непараметрической статистике, открытие ранговых критериев [49].

1949 г. – схема *Jack knife*, прообраз схемы перекрёстного наблюдения [50]. Идея получила развитие в *Cross validation* М. Стоуна [51], в информационном критерии Х. Акаике [52] и в методе *Generalized cross validation* Г. Уабы [53].

1956 г. – открытие ядерных оценок плотности распределения вероятностей [54, 55].

1960 г. – схема «ε-загрязнения» разрешила спор о CAO/СКО между А. С. Эддингтоном и Р. А. Фишером [56] в пользу робастной статистики [57].

1963 г. – третий прорыв в непараметрической статистике, использование ранговых критериев для оценивания неизвестных параметров [58].

1966 г. – выделение теории измерительных задач из теории измерений в специальный раздел теоретической метрологии [59].

1968 г. – метод группового учёта аргументов (МГУА) с контрольным окном 1/2 в схеме перекрёстного наблюдения [60].

1971 г. – расстояние по вариации между плотностями распределений вероятностей $f(x)$ и $f_*(x)$ по аналогии с расстоянием Колмогорова [61, с. 327]:

$$\rho(F, F_*) = \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x) - f_*(x)| dx.$$

1976 г. – границы неисключённой систематической погрешности при равномерном распределении её составляющих «путём построения композиции» согласно ГОСТ 8.207-76 «ГСИ.

Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения»:

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2},$$

где « Θ_i – граница i -й неисключённой систематической погрешности; k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью. Коэффициент k принимают равным 1,1 при доверительной вероятности $P = 0,95$.»

1979 г. – метод *Boot strap* как обобщение схемы *Jack knife* на случайный выбор удаляемых членов статистического ряда [62].

1982 г. – ММК с распределением погрешностей экстраполяции идентифицируемой математической модели на контрольную часть выборки данных совместных измерений в схеме перекрёстного наблюдения с контрольным окном 1/2 в качестве критерия идентификации [28].

1983 г. – теорема о связи æ-критерия (вероятности согласия) с расстоянием Колмогорова и расстоянием по вариации Фёллера [63, с. 15]:

$$\begin{aligned} \text{æ}_{\Psi_1 \Psi_2} &\equiv \int_{-\infty}^{+\infty} \inf_f \{f_{\Psi_1}(\psi), f_{\Psi_2}(\psi)\} d\psi \equiv 1 - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x) - f_*(x)| dx \equiv \\ &\equiv 1 - \sum_{m=1}^M (-1)^{m-1} |F(\xi_m) - F_*(\xi_m)|. \end{aligned}$$

1984 г. – в качестве модели погрешности в ГОСТ 8.009-84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» принята свёртка (объединение) распределений составляющих.

1988 г. – схема перекрёстного наблюдения с контрольным окном $(M+1)^{-1}$ для модели объекта измерений с M параметрами при проверке гипотез вырожденности H_0 , непрерывности H_{00} и композиционной однородности H_{000} [8].

2000 г. – общая схема структурно-параметрической идентификации объектов измерений как логика статистического вывода по критерию максимума воспроизводимости или минимума погрешности неадекватности регламентирована Р 50.2.004-2000 «ГСИ. Определение характеристик математических моделей зависимостей между физическими величинами. Основные положения».

2004 г. – контурная оценка неадекватности функции распределения $F(x)$ по статистикам Смирнова и обобщённой формуле обращения

$$f(x) * f_R(x) = \frac{F(x-a) - F(x-b)}{b-a},$$

где $F(x)$ представляет наблюдаемую составляющую результата решения измерительной задачи, а интервал $[a, b]$ – сумму ненаблюдаемых составляющих. Методика контурного оценивания в расчётах точности и достоверности контрольных испытаний регламентирована МИ 2916-2005 «ГСИ. Идентификация распределений вероятностей при решении измерительных задач».

Заметим, эти результаты в рамках композиционного подхода к оцениванию точности позволили оценить неадекватность математических моделей объектов измерений при их идентификации по данным совместных измерений.

А на чем же основана «неопределённость» оценок?

Математика «неопределённости измерения». Казалось бы, теперь следовало бы привести перечень математических результатов, на которых основан моментный подход концепции неопределённости измерения [29], и сравнить.

Однако можно поступить радикально иначе.

Если из «Руководства по выражению неопределённости измерения» полностью удалить текст, то «математический остаток» не представит собой никакой загадки для любого грамотного специалиста. Это значит, что концепция неопределённости никаких новых математических результатов не содержит!

Это – попытка выдать подмену «безопасных» терминов математической статистики «реалистическими» псевдотерминами концепции неопределённости измерения за новый этап развития метрологии. Об этом предупреждали ведущие метрологи России [64–66], в том числе еще и до появления перевода [31]: «пришлось бы “переделать” сотни тысяч, миллионы документов, требующих выражения результатов измерений с той или иной погрешностью» [64, с. 183].

«Переделкой» никто серьёзно не занялся, а в новых нормативных документах «неопределённость измерения» стала тривиальной сменой названий.

Заключение. Приведённый перечень математических результатов показывает, что предмет метрологии, арсенал её методов и средств, последние двести пятьдесят лет непрерывно расширяется, как в рамках композиционного, так и в рамках моментного подхода. Однако по «странному» совпадению в ходе Всесоюзной дискуссии 1970–1990 гг. по проблемам применимости вероятностно-статистических методов критике подверглись математические результаты, составившие впоследствии основу руководства [31] и его приложений. Это были так называемые «нормальная теория», субъективная концепция вероятности, предельные теоремы теории вероятностей, проблема датчиков псевдослучайных чисел в методе Монте-Карло, дисперсионный анализ, проблема устойчивости статистических оценок и т. д. На этот же период в практику теории надёжности и метрологии пришлось широкое внедрение персональных компьютеров, и одним из его инициаторов был профессор Л. К. Горский – главный инженер НИЦ СНПО «Алгоритм» ВО «СОЮЗЭВМКОМПЛЕКС». Персональные компьютеры оказались средством решения одной из важнейших проблем метрологии – проблемы неадекватности математических моделей объектов измерений. Концептуально её решение определил переход от *синонимии измерений и вычислений* к принципу **единства результатов измерений и результатов вычислений**.

Наложением на эти события «катастрофического феномена 1985–1986 гг.» [9, 67] следовало бы воспользоваться для корректировки вошедшего в противоречие с математическими результатами термина *измерение* так, как это сделано в Рекомендации Р 50.2004-2000. Два шага в этом направлении сделаны ВНИИМ имени Д. И. Менделеева в РМГ 29-99 и РМГ 29-2013

«ГСИ. Метрология. Основные термины и определения» в примечаниях к термину **прямое измерение**: «Строго говоря, измерение всегда прямое» и «В основу разделения измерений на прямые, косвенные, совместные и совокупные может быть положен вид модели измерений». Промежуточным шагом ВНИИМ было предложение распространить положения Рекомендации Р 50.2004-2000 на «математическое обеспечение, вычислительные и программные средства, в том числе поставляемые отдельно, характеристики которых документированы производителем или разработчиком». В то же время недоступным для Международного словаря VIM3 [30] оказалось то, что удалось сделать в РМГ 83-2007 «ГСИ. Шкалы измерений. Термины и определения» для уточнения термина *измерение*:

«2.1.1 **шкала (измерений)**: Отображение множества различных проявлений количественного ... свойства на ... упорядоченное множество чисел...

2.4.4 **измерение**: Сравнение конкретного проявления измеряемого свойства ... со шкалой ... измерений этого свойства (величины)».

Таким образом, непрерывное совершенствование математических результатов, используемых в метрологии, с точки зрения математики как универсального языка науки привело к уточнению собственно предмета метрологии.

Современная метрология представляет собой фундаментальную науку о методах и средствах наиболее объективного отображения свойств объектов измерений математическими моделями. Простейшими моделями являются величины или распределения их значений, а более сложными – случайные функции, функционалы и операторы. К средствам отображения, кроме средств измерений, относятся средства вычислительной техники с соответствующим математическим, алгоритмическим и программным обеспечением для решения измерительных задач. Именно применение этих методов и средств метрологии в сочетании с проверкой на неадекватность составляют количественную основу других наук, без чего усилия в рамках этих наук, «направленные к познанию действительности», оказываются малоэффективными.

Искусственное присоединение метрологии в качестве вспомогательной дисциплины к другим наукам затеняет ведущую роль метрологического обеспечения этих наук. А ведь основной целью Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» является защита прав и законных интересов граждан, общества и государства от отрицательных последствий недостоверности результатов измерений. Метрологический инструмент этой защиты – нормы доверительной вероятности, установленные государственными поверочными схемами, подтверждённые при поверке, обеспеченные при калибровке средств измерений, а также при метрологической аттестации методик решения измерительных задач, включая их математическое и программное обеспечение!

В связи с вышеизложенным можно понять возникающие сложности при подготовке и повышении квалификации специалистов-метрологов, о чём чётко указано в Распоряжении Правительства Российской Федерации № 737-р от 19.04.2017 г. «Об утверждении Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года»: «Начиная с последнего

десятилетия прошлого столетия, не происходит качественного повышения уровня профессиональной подготовки специалистов в области обеспечения единства измерений. Одновременно уменьшается число квалифицированных специалистов-метрологов. Это касается специалистов всех уровней – от техников до профессорско-преподавательского состава».

Выход из этого положения уже наметился: переход на новые учебные программы по специальности «Метрология и метрологическое обеспечение», повышение квалификации профессорско-преподавательского состава и компьютеризация (цифровизация) метрологической деятельности на основе решения прикладных проблем неадекватности для математических моделей объектов.

Список источников/References

1. Лебег А. Об измерении величин: Пер. с фр. Кисловской-Карской О. И. под ред. и с предисловием А. Н. Колмогорова. М.: Госучпедгиз, 1938. 216 с.
2. Вопросы кибернетики, ВК-94: Статистические методы в теории обеспечения эксплуатации / Под ред. С. Ф. Левина. М.: Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР, 1982. 152 с.
3. Налимов В. В. Вероятностная модель языка: О соотношении естественных и искусственных языков. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1979. 304 с.
4. Алимов Ю. И. Альтернатива методу математической статистики. М.: Знание, 1980. 64 с.
5. Алимов Ю. И. О практической ценности теории оценок // Автоматика. 1981. № 2. С. 84–94.
6. Эльясберг П. Е. Измерительная информация: сколько её нужно? Как её обрабатывать? М.: Наука, 1983. 400 с.
7. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
8. Левин С. Ф., Блинов А. П. Научно-методическое обеспечение гарантированности решения метрологических задач вероятностно-статистическими методами // Измерительная техника. 1988. № 12. С. 5–8.
9. Гарантированность программ обеспечения эксплуатации техники. Методические рекомендации. Киев: Знание, 1989. 24 с.
10. Статистическая идентификация, прогнозирование и контроль. Методические рекомендации. М.: МО СССР, 1990. 80 с.
11. Статистическая идентификация, прогнозирование и контроль // Тезисы докладов 2-го Всесоюзного научно-технического семинара. Севастополь, 4–6 сентября 1991. Севастополь: Знание, 1991. 78 с.
12. Контроль технических объектов по аварийным и определяющим параметрам. Методические рекомендации. Киев: Знание, 1992. 24 с.
13. Scheffe H., *The Analysis of Variance*, New York, John Wiley & Sons, 1959, 477 p.
14. Korn G. A., Korn T. M., *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*, New York, McGRAW-Hill Book Company, 1961, 1509 p.
15. *Classification and Clustering, Proceedings of an Advanced Seminar conducted by the Mathematics Research Center*, the

University of Wisconsin-Madison, May 3–5 1976, ed. J. Van Ryzin, New York, Academic Press, 1977, 467 p.

16. Runion R. P., *Nonparametric Statistics: A Contemporary Approach*, Addison-Wesley Publishing Company, 1977, 199 p.
17. Mosteller F., Tukey J. W., *Data Analysis and Regression: A second course in statistics*, Massachusetts, USA, Addison-Wesley, 1977, 588 p.
18. Hollander M., Wolfe D. A., *Nonparametric Statistical Methods*, New York, John Wiley & Sons, 1999, 787 p.
19. Huber P., *Robust Statistics*, New York, John Wiley & Sons, 1981, 317 p.
20. Вучков И., Бояджиева Л., Солаков Е. Прикладной линейный регрессионный анализ: Пер. с болг. Ю. П. Адлера. М.: Финансы и статистика, 1987. 239 с.
21. Hampel F. R., Ronchetti E. M., Rousseeuw P. J., Stahel W. A., *Robust Statistics: The Approach Based on Influence Functions*, New York, John Wiley & Sons, 1986, 526 p.
22. Колмогоров А. Н. Реальный смысл результатов анализа // Труды II Всесоюзного совещания по математической статистике. Ташкент, 27 сентября – 2 октября 1948. Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1949 г. С. 240–268.
23. Вентцель Е. С. Методологические особенности математики на современном этапе // Сборник Математики о математике. М.: Знание, 1982. С. 37–55.
24. Адлер Ю. П., Грановский Ю. В., Маркова Е. В. Теория эксперимента: прошлое, настоящее, будущее. М.: Знание, 1982.
25. Тутубалин В. Н. Теория вероятностей: Краткий курс и научно-методические замечания. М.: Изд-во Московского университета, 1972. 231 с.
26. Математическая энциклопедия. В 5 т. / Гл. ред. И. М. Виноградов. Т. 1. А–Г. М.: Советская энциклопедия, 1977. 1152 стб.
27. Математическая энциклопедия. В 5 т. / Гл. ред. И. М. Виноградов. Т. 2. Д–Коо. М.: Советская энциклопедия, 1979. 1104 стб.
28. Вопросы кибернетики, ВК-94: Статистический анализ систем обеспечения эксплуатации технических объектов / Под ред. С. Ф. Левина. М.: Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР, 1982. С. 105–122.
29. Руководство по выражению неопределённости измерения: Пер. с англ. / Науч. редактор проф. В. А. Слаев. СПб.: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999. 135 с.
30. International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms, VIM, 3rd edition, 2007, 146 p.
31. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition, ISO, Switzerland, 1993, 101 p.
32. Bich W. et al., *Metrologia*, 2012, vol. 49 (6), pp. 702–705. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/6/702>
33. Левин С. Ф. Принцип Ньютона-Эйлера, концепции вероятности и Руководство по выражению неопределённости измерения // Сборник докладов XIII Международного научно-технического семинара «Неопределённость измерений: научные, законодательные, методические и прикладные аспекты» (УМ-2016), Минск, Республика Беларусь, 13–14 апреля 2016. Минск: БелГИМ, 2016. С. 78–81.
34. Moivre A. de, *The Doctrine of Chances*, London, Wood full, 1738, 258 p.

35. Laplace P., *Oeuvres complètes*, vol. 14, Paris, Gauthier-Villars, 1878, 490 p. (In Fr.)
36. Гаусс К. Ф. Избранные геодезические сочинения. Т. 1. Способ наименьших квадратов: Пер. с лат. и нем. Н. Ф. Булаевского под ред. и с введением Г. В. Багратуни. М.: Изд-во геодезической литературы, 1957. 153 с.
37. Legendre A. M., *Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes*, Paris, F. Didot, 1805. 80 p. (In Fr.)
38. Jacobi C. G. J., De Determinantibus functionalibus, *Journal für reine und angewandte Mathematik*, 1841, bd. 22, ss. 319–359. (In Lat.)
39. Pearson K., Contributions to the Mathematical Theory of Evolution, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1894, vol. A, pp. 71–110.
40. Чебышёв П. Л. Избранные труды. М.: Изд-во Академии наук, 1955. 923 с.
41. Lyapunov A. M., Une proposition générale du calcul de probabilités, *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 1901, vol. 132, pp. 814–815. (In Fr.)
42. Eddington A. S., *Stellar Movements and the Structure of the Universe*, London, Macmillan, 1914, 291 p.
43. Lévy P., *Calcul des probabilités*, Paris, Gauthier-Villars, 1925, 350 p. (In Fr.)
44. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений: Учебное пособие для высших технических учебных заведений. Изд. 3-е, стереотип. М.: Наука, 1969. 512 с.
45. Колмогоров А. Н. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1986. С. 134–141.
46. Wilks S. S., Statistical prediction with special reference to the problem of tolerance limits, *Annals of Mathematical Statistics*, 1942, vol. 13, pp. 400–409.
47. Robbins H., On distribution-free tolerance limits in random sampling, *Annals of Mathematical Statistics*, 1944, vol. 15, pp. 214–216.
48. Scheffé H., Tukey J. W., Nonparametric estimation. I. Validation of order statistics, *Annals of Mathematical Statistics*, 1945, vol. 16, pp. 187–192.
49. Wilcoxon F., Individual comparisons by ranking methods, *Biometrics*, 1945, vol. 1, pp. 80–83.
50. Quenouille M. H., Approximate tests of correlation in time-series, *Journal of Royal Statistical Society*, 1949, no. B 11, pp. 68–84.
51. Stone M. Cross-validated choice and assessment of statistical prediction, *Journal of Royal Statistical Society, Series B*, 1974, vol. 36, no 2, pp. 111–147.
52. Akaike H., New Look at the Statistical Model Identification, *IEEE Trans. Autom. Control*, 1974, vol. AC-19, pp. 716–723.
53. Wahba G., Spline bases, regularization, and generalized cross validation for solving approximation problems with large quantities of noisy data, *Proceedings of the International Conference on "Approximation Theory III"*, ed. W. Cheney, New York, Academic Press, 1980, p. 905–912.
54. Rosenblatt M., *Annals of Mathematic Statistic*, 1956, vol. 27 (3), pp. 832–837. <https://doi.org/10.1214/aoms/11777281901956>
55. Parzen E., *Annals of Mathematic Statistic*, 1962, vol. 33 (3), pp. 1065–1076. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177704472>
56. Fisher R. A., *Monthly Notice Royal Astronomical Society*, 1920, vol. 80, pp. 758–770. <https://doi.org/10.1093/MNRAS/80.8.758>
57. Tukey J. W., A survey of sampling from contaminated distributions, *Contributions to Probability and Statistics*, ed. I. Olkin, Stanford, Stanford University Press, 1960, pp. 448–485.
58. Hodges J. L.-Jr., Lehmann E. L., *Annals of Mathematic Statistic*, 1963, vol. 34 (2), pp. 598–611. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177704172>
59. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. Изд. второе, исправленное и дополненное. М.: Физматгиз, 1962. 352 с.
60. Ивахненко А. Г. Метод группового учёта аргументов – конкурент метода стохастической аппроксимации // Автоматика. 1968. № 3. С. 58–72.
61. Feller W., *An Introduction to Probability theory and its Applications*, in 2 vols, vol. II, sec. ed., New York-London-Sydney-Toronto, John Wiley & Sons, 1971.
62. Efron B., Bootstrap methods: another look at the jackknife, *The Annals of Statistics*, 1979, vol. 7, no 1, pp. 1–26.
63. Левин С. Ф. Основы теории контроля. М.: МО СССР, 1983. 52 с.
64. Кузнецов В. А., Ялунина Г. В. Метрология (теоретические, прикладные и законодательные основы): Учебное пособие. М.: Изд-во стандартов, 1998. 336 с.
65. Кузнецов В. А., Ялунина Г. В. Общая метрология. М.: Изд-во стандартов, 2001. 272 с.
66. Кузнецов В. А., Исаев Л. К., Шайко И. А. Метрология / Под ред. В. А. Кузнецова. М.: Стандартиформ, 2005. 297 с.
67. Fritsch O., Santamaria J., Aviation safety – a review of the 1985 record, *ICAO Bulletin*, 1988, vol. 41, no 10, pp. 15–17.

Статья поступила в редакцию 01.04.2022; одобрена после рецензирования 06.04.2022; принята к публикации 11.04.2022.
The article was submitted 01.04.2022; approved after reviewing 06.04.2022; accepted for publication 11.04.2022.

Научная статья

УДК 546.294; 536.76

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-22-28>

Термодинамические свойства хладагента R1233zd(E): методика построения фундаментального уравнения состояния и табулированные данные

Виктор Александрович Колобаев¹, Сергей Владимирович Рыков^{2✉}, Ирина Владимировна Кудрявцева³, Евгений Евгеньевич Устюжанин⁴, Петр Васильевич Попов⁵, Владимир Алексеевич Рыков⁶, Александр Дмитриевич Козлов⁷

^{1, 5, 7} Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия

^{2, 3, 6} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

¹kolobaev@vniims.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7488-4193>

²togg1@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0428-9625>

³neva0175@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7718-9660>

⁴evgust@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8919-9797>

⁵p.popov@vniims.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8435-4356>

⁶rykov-vladimir@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4694-6590>

⁷kozlov@vniims.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5435-5356>

Аннотация. Рассмотрено использование в низкотемпературной технике экологически безопасных хладагентов, например R1233zd(E), в качестве альтернативы применяемым в настоящее время хладагентам R245fa, R134a, R123. Вещество R1233zd(E) – транс-1-хлор-3,3,3-трифтор-1-пропен – относится к фторированным углеводородным соединениям. Для расчёта равновесных характеристик (плотности, энтропии и др.) этого вещества предложено единое фундаментальное уравнение состояния, которое удовлетворяет ряду требований: учитывается асимметричный характер поведения реальной жидкости относительно критической изохоры в соответствии с современной физикой критических явлений; реализуется переход данного уравнения в вириальное уравнение состояния в области разреженного газа; в широкой окрестности критической точки согласуется с масштабным уравнением Берестова. На основе предложенного уравнения состояния в диапазонах температуры 195,15–450 К и давления 0,1–100 МПа для R1233zd(E) рассчитаны термодинамические таблицы стандартных справочных данных в однофазной области и на линии насыщения, включающие плотность, энтропию и энтальпию, скорость звука, изохорную и изобарную теплоёмкости, а также теплоту парообразования. В соответствии с ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 и международной методикой, рекомендуемой для оценки неопределённости табулированных данных, оценены неопределённости значений характеристик в указанных стандартных таблицах. Выполнен сравнительный анализ характеристик R1233zd(E), рассчитанных по предложенному уравнению состояния, с экспериментальными и литературными данными.

Ключевые слова: транс-1-хлор-3,3,3-трифтор-1-пропен, равновесные характеристики, уравнение состояния, критическая точка, потенциал глобального потепления

Для цитирования: Колобаев В. А., Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Устюжанин Е. Е., Попов П. В., Рыков В. А., Козлов А. Д. Термодинамические свойства хладагента R1233zd(E): методика построения фундаментального уравнения состояния и табулированные данные // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 22–28. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-22-28>

Thermodynamic properties of R1233zd(E) refrigerant: a technique for constructing the fundamental equation of state and tabulated data

Viktor A. Kolobaev¹, Sergey V. Rykov^{2✉}, Irina V. Kudryavtseva³, Evgeniy E. Ustyuzhanin⁴, Peter V. Popov⁵, Vladimir A. Rykov⁶, Aleksandr D. Kozlov⁷

^{1, 5, 7} All-Russian Research Institute of Metrological Service, Moscow, Russia

^{2, 3, 6} University ITMO, St. Petersburg, Russia

⁴ National Research University "MPE", Moscow, Russia

¹kolobaev@vniims.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7488-4193>

²togg1@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0428-9625>

³neva0175@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7718-9660>

⁴evgust@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8919-9797>

⁵p.popov@vniims.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8435-4356>

⁶rykov-vladimir@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4694-6590>

⁷kozlov@vniims.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5435-5356>

Abstract. The substance trans-1-chloro-3,3,3-trifluoro-1-propene (R1233zd(E)) refers to fluorinated hydrocarbon compounds; it is currently being considered as an alternative, firstly, to the refrigerant R245fa, which works in organic Rankine cycles. Secondly, R1233zd(E) works as an alternative to the R134a and R123 refrigerants previously used in chillers. To calculate the equilibrium properties (density, entropy, etc.) of this substance, a unified fundamental equation of state (UFEoS) is proposed that satisfies a number of requirements, including: a) takes into account the asymmetric nature of the behavior of a real fluid relative to the critical isochore in accordance with the requirements of modern physics of critical phenomena, b) implements the transition of the UFEoS into the virial equation of state in the region of a rarefied gas, c) in a wide vicinity of the critical point is consistent with the scaling Berestov equation. On the basis of UFEoS in the temperature range from the triple point temperature, 195.15 K to 450 K and pressures from 0.1 MPa to 100 MPa, thermodynamic tables of standard reference data in the single-phase region and on the saturation line, including density, entropy and enthalpy, speed of sound, isochoric and isobaric heat capacities and heat of vaporization are calculated. Based on GOST 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 and the international methodology recommended for assessing the uncertainty of tabulated data, the uncertainty of the properties included in these standard tables was estimated. A comparative analysis of the properties calculated by the UFEoS with the experimental and literature data on the properties of R1233zd(E) has been made.

Keywords: trans-1-chloro-3,3,3-trifluoro-1-propene, equilibrium properties, equation of state, critical point, global warming potential

Введение. Хладагент R1233zd(E) в экологическом плане безопасен, так как имеет нулевой потенциал разрушения озонового слоя. Во всём мире переходят к использованию в низкотемпературной технике экологически безопасных хладагентов, в частности гидрохлорфторолефинов [1], к которым относится и R1233zd(E). В Российской Федерации данный переход регламентируется постановлением Правительства РФ от 25 марта 2020 г. № 333 «О принятии Российской Федерацией поправки к Монреальскому протоколу по веществам, разрушающим озоновый слой». Химическая формула хладагента R1233zd(E): $C_3ClF_3H_2$. В его состав входит хлор, но этот хладагент быстро распадается и поэтому не оказывает заметного влияния на атмосферу Земли. Согласно стандарту ASHRAE (ANSI/ASHRAE standard 34-2013, 2015. Designation and safety classification of refrigerants NE, Atlanta, GA 30329-2305) хладагенту R1233zd(E) присвоена классификация A1. Экспериментальная информация о равновесных характеристиках R1233zd(E) получена в период 2015–2021 гг. [2–13]. При этом уравнения состояния R1233zd(E) [2, 7, 10], разработанные на основе данных [2–13], даже качественно не удовлетворяют требованиям масштабной теории критических явлений и в связи с этим не могут быть определены как единые фундаментальные уравнения состояния (ЕФУС). К ЕФУС относятся уравнения, переходящие в области малых плотностей в вириальное уравнение состояния, а в широкой окрестности критической точки в масштабное уравнение, например уравнение Берестова [14]. Требованиям, предъявляемым к ЕФУС [15], в целом удовлетворяют фундаментальные уравнения состояния (ФУС), которые использованы при описании SF_6 [16] и хладагентов R1234yf [17, 18], R218 [19, 20].

Цель настоящей работы – предложить ЕФУС R1233zd(E). В данном ЕФУС учитываются особенности термодинамической поверхности в широкой окрестности критической точки ($\rho_{кр}$, $T_{кр}$, $p_{кр}$) в отличие от ФУС [17], в рамках которого в соответствии с масштабной теорией критических явлений (далее – масштабной теорией) описывается только асимптотическая окрестность критической точки. Применение ЕФУС позволит уменьшить неопределённость значений равновесных характеристик данного хладагента в этой области параметров состояния по сравнению с использованием ФУС [17].

Построение комплекса уравнений. Рассмотрим комплекс $G=(\rho, H, s, C_p, w, r)$ следующих характеристик: плотности ρ ,

энтальпии H , энтропии s , изобарной C_p и изохорной C_v теплоёмкостей, скорости звука w , теплоты парообразования r .

В настоящем исследовании свойств R1233zd(E) при построении ЕФУС выбрана модель в форме свободной энергии Гельмгольца $F(T, \rho)$ [21]. В соответствии с [21] в структуру модели включены масштабные функции $a_i(x)$ свободной энергии:

$$F(T, \rho) = F_0(T, \rho) + RT\omega \sum_{i=0}^{22} \sum_{j=0}^4 (C_{i,j} \tau_i^j \Delta \rho^j) + RT_{кр} f|\Delta \rho|^{\delta+1} \sum_{i=0}^4 \Gamma_i a_i(x), \quad (1)$$

где $F_0(T, \rho)$ – идеально-газовая составляющая свободной энергии Гельмгольца; R – универсальная газовая постоянная; $\omega = \rho/\rho_{кр}$; $\rho_{кр}$ – критическая плотность; $C_{i,j}$, Γ_i – индивидуальные параметры; $\tau_i = t^{-1} - 1$; $t = T/T_{кр}$; $T_{кр}$ – критическая температура; $\Delta \rho = \omega - 1$; δ – критический индекс критической изохоры.

Функции $a_i(x)$, $i = 0, 1, \dots, 4$, имеют вид

$$a_0(x) = A_0((x+x_1)^{2-\alpha} - \varepsilon_0(x+x_2)^{2-\alpha}) + B_0(x+x_3)^{\gamma} + C_0; \quad (2)$$

$$a_1(x) = A_1((x+x_4)^{2-\alpha+\Delta_1} - \varepsilon_1(x+x_5)^{2-\alpha+\Delta_1}) + B_1(x+x_6)^{\gamma+\Delta_1} + C_1; \quad (3)$$

$$a_2(x) = (x+x_7)^{2-\alpha+\Delta_2} - \frac{x_7}{x_8}(x+x_8)^{2-\alpha+\Delta_2} + C_2; \quad (4)$$

$$a_3(x) = (x+x_9)^{\gamma+\Delta_3} + C_3; \quad (5)$$

$$a_4(x) = (x+x_{10})^{\gamma+\Delta_4} - (x+x_{11})^{\gamma+\Delta_4} + C_4. \quad (6)$$

Здесь $A_0 = -k\gamma_1[2ab^2\alpha_1(1-\varepsilon_0)]^{-1}$; $B_0 = (2k)^{-1}$; $\alpha_1 = (\alpha-2)(\alpha-1)$; $\gamma_1 = \gamma(\gamma-1)$; $\varepsilon_0 = x_1/x_2$; $b^2 = (\gamma-2\beta)[\gamma(1-2\beta)]^{-1}$; $k = [(b^2-1)x_0^{-1}]^\beta$; $x = \tau/|\Delta \rho|^{1/\beta}$; $\tau = t-1$; α – критический индекс изохорной теплоёмкости; γ – критический индекс изотермической сжимаемости; β – критический индекс линии насыщения; $B_1 = B_0$; C_i – постоянные, которые находятся из равенств [21]:

$$A_1 = k\gamma_2[2ab^2\alpha_2(1-\varepsilon_1)]^{-1}; \quad \alpha_2 = (2-\alpha+\Delta_1)(1-\alpha+\Delta_1);$$

$$\gamma_2 = (\gamma-1+\Delta_1)\gamma; \quad \varepsilon_1 = x_4/x_5; \quad \Delta_1 = 0,51;$$

$$\Delta_2 = \beta\delta - \alpha - \beta; \Delta_3 = \Delta_4 = \beta\delta - 1.$$

Выбор свободной энергии Гельмгольца в виде (1) существенно упрощает алгоритм поиска неизвестных коэффициентов и параметров уравнения. Как показано в работах [16–20], структура ЕФУС (1) физически обоснована в рамках масштабной теории [22], согласуется с гипотезой Бенедика [23] и феноменологической теорией критической точки [24].

Функцию f в ЕФУС (1) называют кроссоверной функцией и задают выражением [20]:

$$f = \exp[-a(\Delta\rho)^2/\omega^b]. \quad (7)$$

Такой выбор кроссоверной функции позволяет перейти в области малых плотностей и давлений в (1) к вириальному уравнению состояния, а в широкой окрестности критической точки к масштабному уравнению Берестова [14].

Таблица 1

Коэффициенты $C_{i,j}$ ЕФУС (9) при $j=0, 1^*$

i	0	1
3	0	-1,95123552683476
4	0	-1,88560208886258
5	0	7,63571937416954
6	-0,0187926579129102	5,66409179510651
7	-0,265119870742184	-30,7754066853921
8	-0,322037822727017	2,36524590209267
9	1,45299739755684	67,3397929338214
10	0,128315969317166	-52,382578413557
11	-3,29571877942356	-52,0505646010202
12	2,0651206403006	90,4369357983852
13	2,46894620521876	-17,4924199868612
14	-3,30582000566051	-49,0502424369537
15	0,234469179609276	41,3980236675249
16	1,59604879417786	-5,30175393271547
17	-0,928955840081147	-11,0967070939427
18	-0,0252093296033048	8,61826226172117
19	0,226666245110045	-3,18005084485859
20	-0,101437647488095	0,676176531313158
21	0,0197418968266194	-0,0800410926640001
22	-0,00150687305611609	0,00412498207405363

* $C_{i1}=0$ для $i=0, 2$.

Таблица 2

Коэффициенты $C_{i,j}$ ЕФУС (9) при $j=2^*, 3, 4$

i	2	3	4
0	2,96482549550168	1,93910255747981	-0,0193154767824647
1	-2,01645462897761	-0,575947323558418	0
2	-1,80268332706046	-0,931504039676683	0
3	3,7478941362398	0,577929182114328	0
4	-2,3666237501656	-0,100207119931226	0
5	0,482392565029314	1,93910255747981	-0,0193154767824647

* $C_{i2}=0$ для $i=7, 22$.

Чтобы удовлетворить степенным законам масштабной теории [25], необходимо выполнить условия [23]:

$$\left. \begin{aligned} (\partial^n \rho / \partial p^n)_T \Big|_{p=p_{кр}, T=T_{кр}} &= 0; \\ (\partial \rho / \partial p)_{p=p_{кр}, T \rightarrow T_{кр}} &= o(\tau), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $n \in \{1, 2, 3, 4\}$; o – символ Ландау.

ЕФУС удовлетворяет условиям (8), если привести (1) к следующему виду:

$$\begin{aligned} F(T, \rho) = RT \left[a_1 + a_2 \frac{T_{кр}}{T} + 3 \ln \left(\frac{T_{кр}}{T} \right) + \sum_{i=1}^2 v_i \ln \left(1 - \exp \left(\frac{u_i}{T} \right) \right) \right] + \\ + RT \omega \sum_{i=0}^{22} \sum_{j=0}^4 (C_{i,j} \tau_i^j \Delta \rho^j) + RT_{кр} f t^{-2} \sum_{i=0}^4 \Gamma_i |\Delta \rho|^{\delta + \frac{\Delta_i}{\beta} + 1} a_i(x) + \\ + RT [\tau_l (\omega^2 - 3\omega) D_1 + \tau_l (\omega^3 - 2\omega^2) D_2 + \omega y_1 + \\ + \omega (y_2 - y_3) D_3 + \omega y_3 (Z_{кр} - 0,2) + \ln(\rho)], \end{aligned} \quad (9)$$

где $Z_{кр} = p_{кр} (R p_{кр} T_{кр})^{-1} \cdot 10^6$;

$y_1 = -7,7/6 + 2,9/6 \Delta \rho - 1,1/6 \Delta \rho^2 + 0,05 \Delta \rho^3$;

$y_2 = 5 - 4 \Delta \rho + 3 \Delta \rho^2 - 2 \Delta \rho^3 + \Delta \rho^4$; $y_3 = 4 - 3 \Delta \rho + 2 \Delta \rho^2 - \Delta \rho^3 + \Delta \rho^5$.

Согласно [2] в формуле (9) приведены следующие значения параметров:

$a_1 = -22,634279041372942$; $a_2 = 10,09771000580399$;

$a_3 = 3$; $v_1 = 11,795$; $v_2 = -630$; $u_1 = 8,6848$; $u_2 = -2230$.

Остальным параметрам ЕФУС (9) авторами настоящей статьи присвоены следующие значения:

$x_0 = 0,20579$; $T_{кр} = 439,6$ К; $p_{кр} = 3,6237$ МПа; $\rho_{кр} = 480,22$ кг/м³;

$R = R_0/m$; $R_0 = 8,314472$ Дж/(моль · К); $m = 130,4944$ г/моль;

$R = 72,907$ кДж/(кг · К); $a = 2$; $b = 0,5$; $\Gamma_0 = 4,928917809470209$;

$\Gamma_1 = 5,179898906070549$; $\Gamma_2 = -8,127243152025038$;

$\Gamma_3 = -4,802140517489015$; $\Gamma_4 = 12,5753101363334$;

$D_1 = 0,8662621664467305$; $D_2 = 0,8606388576320895$;

$D_3 = -2,980624556653122 \cdot 10^{-3}$; $\beta = 0,3255$; $\gamma = 1,239$; $\delta = 4,806$;

$\alpha = 0,11$; $x_1 = 0,5777034915685654$; $x_2 = 2,978137364492417$;

$x_3 = 1,179684616103172$; $x_4 = 0,5777034915685654$;

$x_5 = 2,978137364492417$; $x_6 = 1,179684616103172$; $x_7 = 0,59$;

$x_8 = 0,6$; $x_9 = 0,9$; $x_{10} = 0,7$; $x_{11} = 0,63$;

коэффициенты $C_{i,j}$ представлены в табл. 1, 2.

Таблица 3

Значения постоянных d_i, s_i уравнения (10)

i	d_i	s_i
0	7,0	0
1	7,40955	0
2	-20,467135974687977	0
3	-79,44850776076927	0
4	78,45265874717091	2
5	-29,89466482710171	3
6	11,695026391711245	7
7	-27,676095777531515	9
8	25,35401451569262	11

В комплекс уравнений, предназначенных для расчёта таблиц стандартных справочных данных (ССД) R1233zd(E), авторы настоящей статьи включили уравнение линии упругости $p = p_s(T)$, которое разработано по методике, подробно рассмотренной в [26]:

$$p_s(T) = p_{кр} \exp(-d_0 T_{кр} \tau^2 T^{-1}) \times \left(1 + d_1 \tau + d_2 |\tau|^{2-\alpha} + d_3 |\tau|^{2-\alpha+\Delta} + \sum_{i=4}^8 d_i \tau^{s_i} \right). \quad (10)$$

Это позволяет существенно упростить расчёт табулированных свойств на линии фазового равновесия R1233zd(E). Значения коэффициентов d_i и показателей степени s_i , которые входят в уравнение (9), определены на основе экспериментальной информации [2–8] по методике [26] и представлены в табл. 3.

Для проверки компьютерного кода в табл. 4 приведены значения ряда равновесных свойств R1233zd(E), рассчитанные по ЕФУС (9).

Табулирование термодинамических характеристик, оценка их неопределённости и сравнение расчётных значений с экспериментальными данными. На основе ЕФУС (9) рассчитаны таблицы ССД о характеристиках R1233zd(E) $G = (p, H, s, C_p, w, r)$, значения которых находятся в диапазонах температуры 195,15–450 К и давления 0,1–100 МПа.

В настоящей работе стандартная неопределённость u_A по типу А вычислена методом сравнения экспериментальных значений r_i с соответствующими характеристиками r , найденными по рекомендуемому уравнению, например, по уравнению линии упругости (10). Неопределённость u_A оценим согласно ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 «Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения»:

$$u_A(r) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i - r_{cp})^2 [n(n-1)]^{-1}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta r_i)^2 [n(n-1)]^{-1}}, \quad (11)$$

где $\Delta r_i = r_i - r_{cp}$ – абсолютное отклонение табулированной характеристики в i -й точке из массива опытных данных [2–13]; $r_{cp} = r(x, y)$ – значение табулированной характеристики, вычисленное по соответствующему рекомендуемому уравнению и аргументам (x, y) в i -й точке; n – число экспериментальных значений r_i , отобранных в массив $X = (r, x, y)$ для оценки неопределённости $u_A(r)$.

Согласно ГОСТ 34100.3-2017 и с учётом (11) среднее квадратическое отклонение $S(r)$ в процентах рассчитаем как стандартную относительную неопределённость

$$S(r) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta r_i)^2 [n(n-1)]^{-1}}, \quad (12)$$

где $\delta r_i = 100(r_i - r_{cp})/r_i$ – относительное отклонение экспериментального значения характеристики $r = r_i$ от вычисленного по уравнению (9) или (10) значения $r = r_{cp}$ в i -й точке.

Таблица 4

Стандартные справочные данные о свойствах R1233zd(E)

p , МПа	T , К	ρ , кг/м ³	H , кДж/кг	S , кДж/(кг·К)	C_p , кДж/(кг·К)	C_p , кДж/(кг·К)	w , м/с
0,1	195	1488,630	112,190	0,62207	0,76008	1,092	1119,420
10,0	450	870,368	434,121	1,63030	1,01260	1,507	291,486

Таблица 5

Неопределённости параметров R1233zd(E)

Параметр	u_B	u_c	U	S
ρ	0,12	0,12	0,24	0,014
C_p	0,58	0,94	1,90	0,740
w	0,18	0,18	0,37	0,089
p	0,12	0,12	0,25	0,021
p_s	0,069	0,12	0,24	0,096

Значение $S(r)$ характеризует отклонение массива экспериментальных данных [2–13] характеристики r от значений, рассчитанных по ЕФУС (9) или уравнению (10).

Неопределённости $u_B(r)$ по типу В (оценки неисключённых систематических относительных погрешностей δr_i) запишем в виде стандартной относительной неопределённости

$$u_B(r) = (b_{i-} + b_{i+}) / (2\sqrt{3}). \quad (13)$$

В (13) $b_{i-} = r_i - a_{i-}$; $b_{i+} = r_i + a_{i+}$, где a_{i-} и a_{i+} – соответственно нижняя и верхняя границы интервала изменений r_i .

Суммарную стандартную относительную неопределённость определим по формуле

$$u_c(r) = \sqrt{S(r)^2 + u_B(r)^2}. \quad (14)$$

Расширенную неопределённость с коэффициентом охвата $k=2$ для доверительной вероятности $P=0,95$ вычислим по выражению

$$U(r) = k u_c. \quad (15)$$

Для хладагента R1233zd(E) на основе уравнения (10), формул (11)–(15) с использованием данных [2–8] оценены неопределённости давления насыщения p_s , а также получены неопределённости плотности, давления $p = \rho^2 (\partial F / \partial \rho)_T$, скорости звука $w = \sqrt{(\partial p / \partial \rho)_T C_p / C_v}$ и изобарной теплоёмкости $C_p = C_v + \rho^{-2} T (\partial p / \partial T)_\rho (\partial \rho / \partial p)_T$ с применением ЕФУС (9) и данных [2, 5, 10, 11, 12, 13] (табл. 5).

Для повышения достоверности оценки неопределённости табулированных данных, полученных на основе ЕФУС (9), в соответствии с рекомендациями [2, 17] по формулам [2, 27] рассчитаем (в процентах) неопределённости табулированных данных, характеризующие абсолютное среднее ADD, систематическое BIAS и стандартное SDV отклонения значений давления, плотности, скорости звука, изобарной

теплоёмкости, давления насыщенного пара (10), указанных в литературе [2–13], от экспериментальных значений:

$$\left. \begin{aligned} \text{AAD} &= n^{-1} \sum |\delta r_i|; \\ \text{BIAS} &= n^{-1} \sum \delta r_i; \\ \text{SDV} &= \sqrt{\sum (\delta r_i - \text{BIAS})^2 (n-1)^{-1}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Рассчитанные по формуле (16) значения отклонений приведены в табл. 6.

Согласно оценке неопределённости табулированных данных $G=(p, H, s, C_p, w, r)$, приведённой в табл. 5, 6 и полученной путём сравнения с соответствующими данными [2–13], установлено, что ЕФУС (9) в пределах погрешности экспериментальных данных [2–13], описывает как термическую поверхность (рис. 1, а), так и опытные данные [2, 12, 13] о скорости звука w (рис. 1, б) и изобарной теплоёмкости (рис. 1, в, 2).

В [7] приведены новые (p, ρ, T) -данные для R1233zd(E) в интервале температур 303–373 К. Используя эти данные, авторы [7] построили уравнение состояния вириального вида и рассчитали второй вириальный коэффициент $B(T)$. В интервале температур 300–600 К вириальные коэффициенты, рассчитанные по (9) и представленные в [2, 7] практически

Таблица 6

Отклонения экспериментальных значений характеристик R1233zd(E)

n	S	AAD	BIAS	SDV	Ссылка
Давление насыщения					
23	0,0484	0,122	0,0248	0,231	[2]
32	0,0698	0,353	0,353	0,166	[3]
49	0,651	2,57	2,57	3,74	[3]
16	0,663	2	–1,97	1,69	[4]
11	0,191	0,341	–0,341	0,525	[5]
94	0,0295	0,147	0,0546	0,281	[6]
94	0,0355	0,145	–0,121	0,322	[6]
18	0,0383	0,154	–0,154	0,0379	[7]
12	0,0561	0,167	0,167	0,0861	[8]
Плотность					
164	0,0263	0,0739	–0,00573	0,336	[2]
97	0,698	3,83	3,13	6,12	[9]
94	0,00472	0,0415	–0,0212	0,0405	[10]
11	0,0176	0,0449	–0,0162	0,0559	[5]
30	0,0054	0,0229	0,0087	0,0282	[11]
63	0,332	2,61	2,61	0,11	[7]
Давление					
164	0,0213	0,15	–0,0601	0,266	[2]
63	0,318	2,50	–2,5000	0,154	[7]
Скорость звука					
155	0,00855	0,0601	0,0129	0,106	[2]
43	0,02760	0,1520	0,0906	0,156	[12]
Изобарная теплоёмкость					
63	0,743	5,41	–5,41	2,24	[13]

совпадают (рис. 3). Однако в области низких температур ($T < 300$ К) вириальный коэффициент $B(T)$ [7] существенно занижен относительно значений $B(T)$, рассчитанных на основе уравнений состояния (9) и [2] (см. рис. 3). С точки зрения авторов настоящей статьи, такое расхождение обусловлено тем, что при построении уравнения состояния авторы [7] использовали только (p, ρ, T) -данные [7] и не использовали экспериментальные данные [2–6, 8–13].

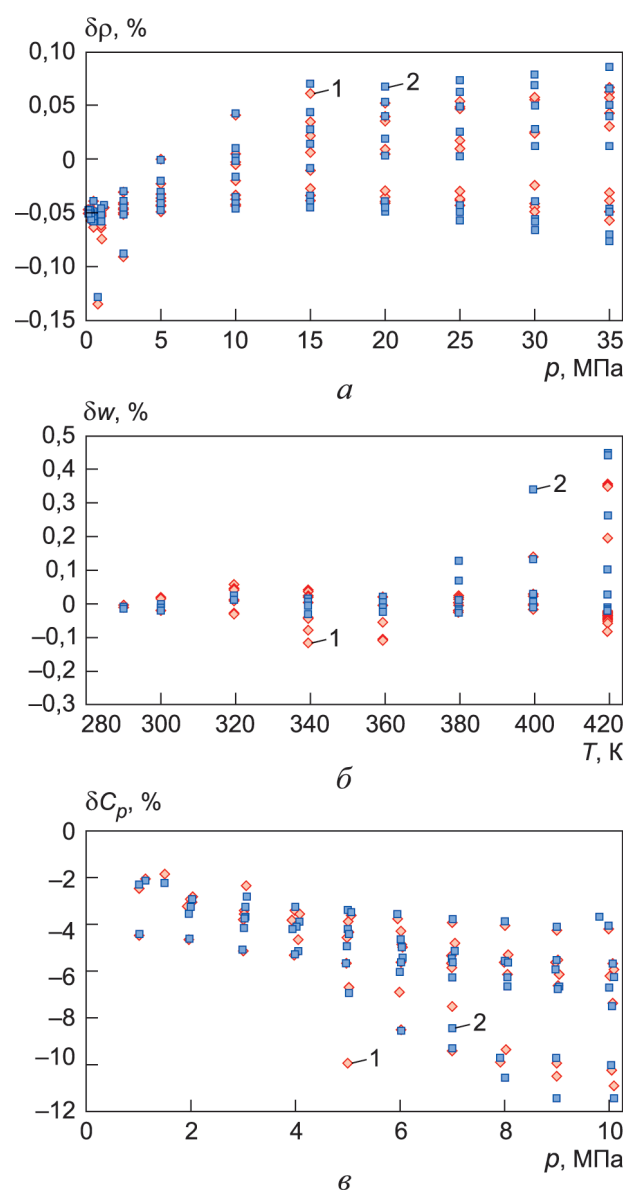


Рис. 1. Относительные отклонения значений параметров хладагента R1233zd(E) рассчитанных по ЕФУС (9) и уравнению состояния [2] (кривые 1, 2 соответственно) от указанных в литературе экспериментальных данных:

а – плотность (данные [10]); б – скорость звука (данные [2]); в – изобарная теплоёмкость (данные [13])

Fig. 1. Relative divergence values of R1233zd(E) calculated as per the equations presented in this study UFEOS (9) (curve 1) and equation of state [2] (curve 2) as compared with the experimental data: а – density [10]; б – speed of sound [2]; в – isobaric heat capacity [13]

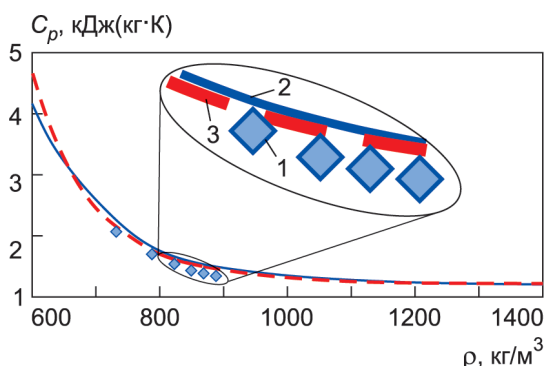


Рис. 2. Изменение изобарной теплоёмкости C_p на псевдоизотерме 445,68 K:
1 – экспериментальные данные [13]; 2, 3 – расчёт по ЕФУС (9) и уравнению состояния [2]

Fig. 2. Behavior of isobaric heat capacity C_p on pseudo isothermal line 445,68 K:
1 – experimental data [13]; 2, 3 – calculated as per UFEOS (9) and equation of state [2]

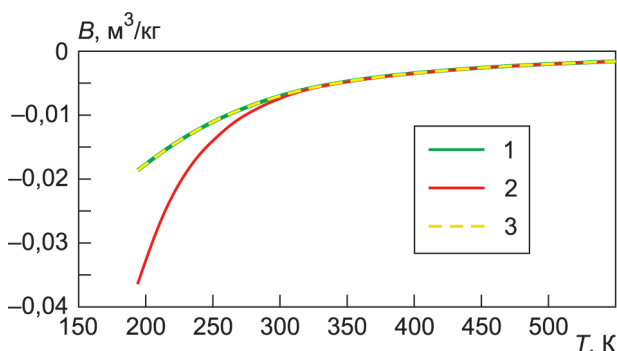


Рис. 3. Изменение второго вириального коэффициента B R1233zd(E), рассчитанные по уравнению состояния [2], вириальному уравнению состояния [7] и ЕФУС (9) – кривые 1–3 соответственно

Fig. 3. Behavior of second virial coefficient of R1233zd(E) calculated as per: 1 – equation of state [2]; 2 – virial equation [7]; 3 – UFEOS (9)

В настоящем исследовании, во-первых, обобщены результаты [2–13]; во-вторых, совпадение вириальных коэффициентов $B(T)$, рассчитанных по ЕФУС (9) и уравнению состояния [2] (см. рис. 3), подтверждает, что неопределённость результатов (см. табл. 6), отвечающих ЕФУС (9), не превышает неопределённости экспериментальных данных [2, 5, 7, 9, 10, 11]; в-третьих, ЕФУС (9) описывает термическую поверхность R1233zd(E) в широком интервале температур и давлений, включая область разреженного газа.

В отличие от ФУС [2, 7, 10] уравнение состояния (9) характеризует изохорную теплоёмкость ($C_v(T \rightarrow T_{кр}, \rho \rightarrow \rho_{кр}) \rightarrow \infty$), скорость звука (рис. 4) и изобарную теплоёмкость (см. рис. 2) в окрестности критической точки в соответствии с масштабной теорией. Поэтому ЕФУС (9) можно рекомендовать для расчёта подробных таблиц ССД о характеристиках $G = (\rho, H, s, C_v, C_p, w, r)$ R1233zd(E) в широкой области параметров состояния, включающей окрестность критической точки.

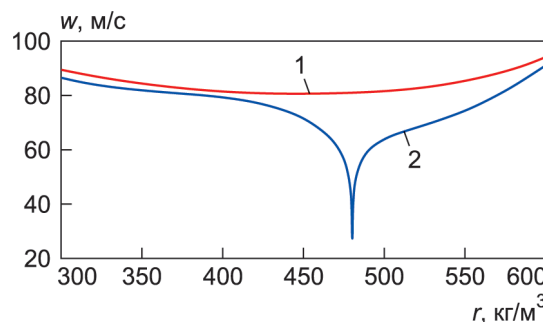


Рис. 4. Изменения скорости звука w R1233zd(E) на околокритической изотерме $T = T_{кр} + 0,0001$ K, рассчитанные по уравнению состояния [2] и ЕФУС (9) – кривые 1, 2 соответственно

Fig. 4. Behavior of speed of sound w of R1233zd(E) on isothermal line $T = T_c + 0.0001$ K calculated as per: 1 – equation of state [2]; 2 – UFEOS (9)

Закключение. На основе предложенного ЕФУС (9) хладагента R1233zd(E) получены табулированные значения равновесных свойств, а также предложены характеристики неопределённости согласно ГОСТ 34100.3-2017 (S , U , u_A , u_B , u_C) и статистические оценки (AAD, BIAS и SDV), используемые при расчёте неопределённости в международных научных исследованиях [2–13, 15–21, 26, 27]. В ЕФУС (9) учитываются особенности поведения реальной жидкости относительно критической изохоры, данное уравнение удовлетворяет требованиям масштабной теории [22] и феноменологической теории критической точки [24], а в области малых плотностей переходит в вириальное уравнение состояния. Применение ЕФУС позволило существенно уменьшить неопределённость полученных табулированных данных хладагента R1233zd(E) в широком интервале параметров состояния, включая область сильно развитых флуктуаций параметра порядка (плотности).

Список источников/References

1. Nair V., *Int. J. Refrig.*, 2021, vol. 122, pp. 156–170. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.10.039>
2. Mondéjar M. E., McLinden M. O., Lemmon E. W., *J. Chem. Eng. Data*, 2015, vol. 60, pp. 2477–2489. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.5b00348>
3. Di Nicola G., Fedele L., Brown J. S., Bobbo S., Coccia G., *J. Chem. Eng. Data*, 2017, vol. 62, pp. 2496–2500. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.6b00916>
4. Hulse R. J., Basu R. S., Singh R. R., Thomas R. H. P., *J. Chem. Eng. Data*, 2012, vol. 57, pp. 3581–3586. <https://doi.org/10.1021/jc300776s>
5. Tanaka K., *Trans. Jpn. Soc. Refrig. Air Cond. Eng.*, 2016, vol. 33, pp. 105–111. https://doi.org/10.1132/tjsrae.15-48_OA
6. Li Sh., Yang F., Zhang K., Duan Y., Yang Zh., *J. Chem. Eng. Data*, 2019, vol. 64, pp. 2947–2954. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00001>
7. Yin J., Ke J., Zhao G., Ma S., *Int. J. Refrig.*, 2021, vol. 121, pp. 253–257. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.09.010>
8. Sakoda N., Higashi Y., Akasaka R., *J. Chem. Eng. Data*, 2020, vol. 65, pp. 4285–4289. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00239>

9. Tanaka K., *J. Chem. Eng. Data*, 2016, vol. 61, pp. 3570–3572. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.6b00502>
10. Fedele L., Pierantozzi M., Di Nicola G., Brown J. S., Bobbo S., *J. Chem. Eng. Data*, 2018, vol. 63, pp. 225–232. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b00841>
11. Romeo R., Giuliano Albo P. A., Lago S., Brown J. S., *Int. J. Refrig.*, 2017, vol. 79, pp. 176–182. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.04.003>
12. Lago S., Giuliano Albo P. A., Brown J. S., Bertinetti M., *J. Chem. Eng. Data*, 2018, vol. 63, pp. 4039–4045. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b00427>
13. Liu Y., Zhao X., *Int. J. Refrig.*, 2018, vol. 86, pp. 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.11.015>
14. Berestov A. T., Equation of state in the critical region with inclusion of non-asymptotic terms, *Sov. Phys. JETP*, 1977, vol. 45, no. 1, pp. 184–187.
15. Rykov V. A., Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Sverdlov A. V., *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, vol. 891, 012334. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012334>
16. Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Rykov S. V., *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1385, 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1385/1/012009>
17. Колобаев В. А., Рыков С. В., Кудрявцева И. В., Устюжанин Е. Е., Попов П. В., Рыков В. А., Сverdlov A. B. Методика построения уравнения состояния и термодинамических таблиц для хладагента нового поколения // Измерительная техника. 2021. № 2. С. 9–15. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-9-15> [Kolobaev V. A., Rykov S. V., Kudryavtseva, I. V. et al., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 2, pp. 86–93. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01901-9>].
18. Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 2057, 012112. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2057/1/012112>
19. Kozlov A. D., Lysenkov V. F., Popov P. V., Rykov V. A., *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 1992, vol. 62, no 6, pp. 611–617. <https://doi.org/10.1007/BF00851887>
20. Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Rykov S. V., Ustyuzhanin E. E., *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 946, 012118. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/946/1/012118>
21. Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1565, 012038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1565/1/012038>
22. Ma Sh., *Modern Theory of Critical Phenomena*, Addison-Wesley, 1976, 561 p.
23. Benedek G. B., *Polarisation Matiere et Rayonnement – Volume Jubilaire en l'Honneur d'Alfred Kastler*, Presses Universitaires de Paris, Paris, 1968, p. 71.
24. Rykov S. V., The fundamental equation of state considering asymmetry of fluid, *Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2014, no. 1, pp. 33–36. (In Russ.)
25. Agayan V. A., Anisimov M. A., Sengers J. V., *Phys. Rev. E*, 2001, vol. 64, 026125. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.026125>
26. Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Ustyuzhanin E. E., Ochkov V. F., *J. Phys. Conf. Ser.*, 2019, vol. 1147, 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1147/1/012017>
27. Mares R., Profous O., and Sifner O., *Int. J. Thermophys.*, 1999, vol. 20, no. 3, pp. 933–942. <https://doi.org/10.1023/A:1022647605881>

Статья поступила в редакцию 28.03.2022; одобрена после рецензирования 11.04.2022; принята к публикации 14.04.2022.
The article was submitted 28.03.2022; approved after reviewing 11.04.2022; accepted for publication 14.04.2022.

Стратегия поиска выбросов в рядах зашумлённых данных с неизвестным трендом

Игорь Витальевич Безменов^{1✉}, Алексей Эдуардович Дроздов², Сергей Леонидович Пасынок³

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

¹bezmenov@vniiftri.ru✉, ²drozdov@vniiftri.ru, ³pasynok@vniiftri.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема обнаружения грубых измерений (выбросов) при автоматизированной обработке рядов измерительных данных, полученных от технических устройств. Предложена модификация разработанной ранее первым из авторов стратегии детектирования выбросов во временных рядах зашумлённых данных, содержащих неизвестный тренд. Ранее разработанная стратегия состоит из двух этапов: построения тренда и применения к остаткам, полученным после вычитания найденного тренда из данных измерений, алгоритма поиска оптимального решения. Поиск тренда осуществляется в классе степенных полиномов с помощью метода наименьших квадратов по наборам опорных значений, количество которых задаётся заранее. Алгоритм поиска тренда осуществляется с помощью абсолютно сходящегося итерационного процесса и основан на методе минимизирующих последовательностей (наборов). При реализации ранее разработанной стратегии необходимо задать общее количество опорных значений, по которым строится тренд, что может исказить определение тренда и детектирование выбросов. В предложенной стратегии исправлен указанный недостаток: число опорных значений выбирается из условия минимизации количества обнаруженных выбросов с одной стороны, и из условия максимизации числа опорных значений – с другой. Приведены результаты численного тестирования на реальных данных для спутниковых лазерных дальномерных измерений. Разработанную стратегию можно применять для обнаружения и устранения выбросов из временных рядов измерительных данных на стадии их предварительной обработки.

Ключевые слова: временные ряды, предварительная обработка данных, выбросы, чистка данных от выбросов, оптимальное решение, минимизирующие наборы

Для цитирования: Безменов И. В., Дроздов А. Э., Пасынок С. Л. Стратегия поиска выбросов в рядах зашумлённых данных с неизвестным трендом // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 29–34. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-29-34>

A strategy for finding outliers in noisy data series including an unknown trend

Igor V. Bezmenov^{1✉}, Aleksey E. Drozdov², Sergey L. Pasynok³

^{1, 2, 3} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleev, Moscow Region, Russia

¹bezmenov@vniiftri.ru✉, ²drozdov@vniiftri.ru, ³pasynok@vniiftri.ru

Abstract. One of the problems related to detection of coarse measurements (outliers) in automated processing of data series measured in technical devices has been considered. A modification of the strategy developed by the first author for detecting outliers in time series of noisy data containing an unknown trend is proposed. The previously developed strategy consists of two steps: finding a trend and applying to the residues obtained after subtracting the found trend from the measurement data, an algorithm for finding the optimal solution. The search for a trend is carried out in the power polynomials class by means of the least squares method using sets with preset number of reference values. The trend search algorithm is carried out using a completely convergent iterative process and is based on the method of minimizing sequences (sets). The disadvantage of this strategy is the need to set a priori the total number of reference values by which the trend is built, which can lead to a distorted determination of the trend and incorrect detection of outliers. In the proposed strategy, the number of reference values is selected from the condition of minimizing the number of detected outliers on the one hand, and from the condition of maximizing the number of reference values on the other. The results of numerical testing on real data for satellite laser range finding measurements are given. The proposed strategy can be used to detect and eliminate outliers from time series of data at the stage of their preliminary processing.

Keywords: time series, data preprocessing, outliers, data cleaning, optimal solution, minimizing sets

Введение. Многочисленные достижения в области измерительной техники позволяют с течением времени собирать большой объем данных в различных областях исследований, системах и технологиях, например в Глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС), радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой, спутниковых лазерных дальномерных (СЛД) измерениях и др. Данные, собираемые с ГНСС-приёмников, входящих в международную сеть International GNSS Service [1], используются для решения ряда геодезических и навигационных задач, например, для определения параметров вращения Земли [2] и координат пунктов [3], синхронизации эталонов времени и частоты на больших расстояниях с помощью спутников [4], геометрического нивелирования в гравиметрии [5] и др. При этом к решениям задач в различных областях предъявляются постоянно растущие требования по точности. Так, например, в 2015 г. Глобальная геодезическая система наблюдений провозгласила курс на достижение миллиметровых точностей координат опорных пунктов [6]. Такая точность является необходимым условием для определения фундаментальных систем опорных высот в геодезии с разрешением на сантиметровом уровне [5].

Совершенствование измерительного оборудования, моделей и методов предварительной и вторичной обработки измерений позволяет достичь требуемой точности измерений. При этом для повышения точности измерений необходимо детектирование и удаление из рядов измерительных данных грубых измерений (выбросов), источником которых являются измерительная аппаратура и внешние факторы: многопутность радиосигнала, малый угол склонения наблюдаемого спутника, рефракция атмосферы и др.

Несмотря на использование самого современного программного обеспечения, включающего передовые высокоточные робастные алгоритмы, грубые измерения в данных могут отрицательно сказаться на точности получаемого конечного результата и привести к деградации его метрологических характеристик. Поэтому выбросы необходимо обнаружить и удалить из массива данных на стадии их предварительной обработки.

Понятие грубого измерения (выброса) является ключевым в теории обработки измерительных данных, но для него до сих пор не существует ни универсального определения, ни единого мнения относительно используемых терминов. Выбросы в наблюдениях часто называют аномалиями, дискордантными наблюдениями, исключениями, абберациями, особенностями или загрязнителями [7].

Первое исследование по обнаружению выбросов во временных рядах проведено в [8], где для одномерных временных рядов определены два типа выбросов: точечные выбросы и выбросы в виде подпоследовательностей. Наиболее популярным определением для понятия «точечный выброс» является определение его как наблюдаемого значения измеренной в некоторый момент времени величины, которое значительно отличается от ожидаемого её значения. В соответствии с этим определением значение $y(t)$ в момент времени t может быть объявлено точечным выбросом, если расстояние до его ожидаемого значения $\bar{y}(t)$ больше, чем предопределённое

пороговое значение: $|y(t) - \bar{y}(t)| > \Delta$. На этом неравенстве основано большинство стратегий обнаружения точечных выбросов, описанных в литературе. Различия их в основном заключаются в методах вычисления ожидаемого значения $\bar{y}(t)$ [9–11]. Общий недостаток этих стратегий, препятствующий надёжному определению выбросов, заключается в отсутствии априорной информации о типе возможного выброса, что затрудняет выбор метода оценивания $\bar{y}(t)$. Кроме того, значение Δ порога, как правило, заранее неизвестно, и неточное его задание может привести к неверному детектированию выбросов. Структурированный и всеобъемлющий обзор по современным методам обнаружения выбросов в контексте временных рядов представлен в [7].

Задача детектирования и удаления выбросов в одномерных временных рядах измеренных данных тесно связана с проблемой поиска в них тренда, который обычно неизвестен. Решение этой задачи напрямую влияет на точность конечного результата: при неверном определении тренда заведомо точные данные могут быть отбракованы, а неточные – оставлены для дальнейшей обработки.

Эта задача давно известна и обычно решается нахождением тренда в виде полинома заданной степени (возможны и другие классы функций), аппроксимирующего данные измерений в среднеквадратичной норме. Коэффициенты полинома определяются методом наименьших квадратов, и выбросы детектируются на основе последующего анализа остатков, полученных при вычитании из измеренных данных значений найденного полинома. Однако при таком подходе найденный тренд, как правило, не соответствует составу данных, полученных после отбраковки выбросов, а итерационный процесс последовательного переопределения тренда при заданном уровне среднего квадратического отклонения (СКО) может не сойтись. Чтобы избежать закливания прибегают к уменьшению порога детектирования выбросов, что, в свою очередь, как показано в численных примерах, ведёт к потере заведомо «хороших» данных [12].

Часто максимум реального распределения смещается относительно его среднего значения (асимметрия распределения). В частности, для спутниковых лазерных дальномеров с некоторыми из детекторов распределение смещено в сторону больших отклонений, например, если лазерная система работает в однофотонном режиме. Для уменьшения влияния такого перекоса «хвоста» распределения при обработке СЛД-измерений налагают жёсткие условия на порог отбраковки грубых измерений [13], что, как правило, ведёт к потере данных «хороших» измерений. В условиях сильной зависимости СЛД-измерений от погодных условий доля неоправданно отброшенных данных может в таком случае оказаться существенной по отношению к общему, обычно небольшому, количеству измерений.

В работе [14] представлен новый метод определения тренда в классе степенных полиномов с действительными коэффициентами, основанный на минимизирующих последовательностях (наборах). Там же предложена стратегия и эффективные сходящиеся алгоритмы поиска тренда и обнаружения выбросов. Апробация метода проведена для

детектирования выбросов в рядах симулированных данных. В указанной стратегии есть недостаток: количество опорных значений, по которым строится тренд, должно задаваться заранее, исходя из априорного предположения о максимально возможном количестве выбросов в данных.

Цель статьи – разработка стратегии поиска тренда и обнаружения выбросов, в которой тренд выявляется без априорных заданий пороговых констант.

В настоящей работе предложена стратегия поиска выбросов в рядах зашумлённых данных, содержащих неизвестный тренд. В разработанной стратегии, как и в [14], поиск тренда происходит в классе степенных полиномов. Полиномы строятся с помощью метода наименьших квадратов по опорным значениям, количество которых ищется из условия минимизации количества детектируемых выбросов. Предлагаемая стратегия может рассматриваться как один из вариантов стратегии, рассмотренной в [14].

Постановка задачи. Пусть задана упорядоченная по возрастанию последовательность $\{t_j\}_{j=1}^N$ моментов времени наблюдений (измерений) некоторой случайной величины $Y(t)$. Результаты наблюдений, формируемые техническими устройствами, во многих случаях можно представить в виде одномерного временного ряда:

$$y_j = f_j + z + \xi_j, \quad j = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где $y_j = y(t_j)$ – результат измерения случайной величины $Y(t)$; $f_j = f(t_j)$ – неслучайная функция-тренд, зависящая от физики процесса и, как правило, неизвестная; $z + \xi_j$ – неизвестная случайная величина, представленная в виде суммы неизвестного среднего z и центрированной случайной величины $\xi_j = \xi(t_j)$, распределение которой также неизвестно и которая может содержать выбросы.

Задача автоматизированной обработки данных измерений состоит в том, чтобы обнаружить и исключить выбросы из исходного набора данных. Однозначного решения данная задача не имеет, поскольку само понятие грубого измерения (выброса) не определено однозначно. Предлагаемый в настоящей работе метод обнаружения выбросов основан на стратегии построения тренда с помощью минимизирующих наборов, а также на алгоритме поиска оптимального решения аналогичной задачи для данных со снятым трендом [14].

Оптимальное решение для данных со снятым трендом.

В том случае, когда тренд известен, данные измерений после вычитания тренда можно записать в виде

$$\hat{y}_j = z + \xi_j, \quad j = 1, \dots, N, \quad (2)$$

где $\hat{y}_j = y_j - f_j$.

Часто задача обнаружения выбросов в ряде данных, представленных в виде (2), состоит в отыскании такого набора $Y_L = \{\hat{y}_{j_1}, \dots, \hat{y}_{j_L}\}$ из L элементов (длины L), для которого выполняются условия

$$\sigma_{Y_L} = \sqrt{(L-1)^{-1} \sum_{j \in \{j_1, \dots, j_L\}} (\hat{y}_j - z)^2} \leq \sigma_{\max}; \quad (3)$$

$$|\hat{y}_j - z| \leq 3\sigma_{\max}, \quad j \in \{j_1, \dots, j_L\}, \quad (4)$$

где σ_{Y_L} , $\sigma_{\max}$ – СКО и его заданное пороговое значение.

Значения $\hat{y}_j$, не входящие в Y_L , рассматриваются как выбросы и удаляются из дальнейшей обработки. Часто условия (3), (4) являются единственными условиями, учитываемыми при удалении из исходного набора грубых измерений. Для их нахождения обычно, например в [3], применяется итерационный процесс, который может приводить к неоправданной отбраковке большого числа данных [12].

В [12, 14] сформулирована задача по поиску оптимального решения, в которой условия (3), (4) дополняются двумя следующими условиями экстремума.

Во-первых, из всех наборов Y_L , удовлетворяющих (3), (4), найдём набор максимальной длины L (количество отбракованных значений минимально)

$$L \rightarrow \max. \quad (5)$$

Значение L , при котором достигается максимум (5), обозначим Λ . Заметим, что условие (5) не обеспечивает единственности решения, так как может оказаться несколько наборов длиной Λ , удовлетворяющих (3)–(5).

Во-вторых, из всех наборов Y_L длины $L = \Lambda$, удовлетворяющих (3)–(5), выберем тот, у которого стандартное отклонение σ_{Y_L} примет наименьшее значение

$$\sigma_{Y_L} (\text{при } Y_L = \{\hat{y}_{j_1}, \dots, \hat{y}_{j_L}\}; L = \Lambda) \rightarrow \min. \quad (6)$$

Так как условие (3) предполагает $L > 1$, то решение задачи (3)–(6) может и не существовать, например, в случае, если $\hat{y}_j$ – арифметическая прогрессия с шагом больше $\sqrt{2}\sigma_{\max}$. Если же решение существует, то следуя [12, 14], назовём его оптимальным и обозначим $Y_{\Lambda, \text{opt}} = \{\hat{y}_{j_1}, \dots, \hat{y}_{j_{\Lambda}}\}$. Значения $\hat{y}_j$ ряда (2), не входящие в $Y_{\Lambda, \text{opt}}$ объявляются выбросами. Таким образом, число $N_{\text{out}} = N - \Lambda$ представляет собой количество выбросов в ряде измеренных данных (2), найденных в результате решения задачи (3)–(6).

В [12, 14] приведены абсолютно сходящиеся алгоритмы решения задачи (3)–(6), требующие порядка $(N + N_{\text{out}}^2)$ арифметических операций, т. е. количество операций растёт линейно квадрату от числа N_{out} найденных выбросов. Таким образом, указанные алгоритмы особенно эффективны при относительно небольшом количестве выбросов. Однако, если N_{out} сравнимо с N , то количество арифметических операций – порядка N^2 . Именно для такого типа данных в [14] приведён более быстрый алгоритм (с количеством арифметических операций порядка $N \log N$) решения задачи, аналогичной (3)–(6), в которой условие (4) заменено более слабым условием

$$\max\{\hat{y}_{j_1}, \dots, \hat{y}_{j_L}\} - \min\{\hat{y}_{j_1}, \dots, \hat{y}_{j_L}\} \leq 6\sigma_{\max}.$$

При поиске оптимального решения привязки данных к конкретным моментам времени измерения не требуется, так как решение $Y_{\Lambda, \text{opt}}$ определено с точностью до произвольной перестановки входящих в него чисел. Не имеют значения продолжительности интервалов между последовательными измерениями.

Применение приведённых в [12, 14] алгоритмов поиска оптимального решения приводит к адекватному результату в том случае, если данные измерений не содержат тренд. Применение же этих алгоритмов к данным, содержащим тренд, может дать заведомо неверный результат с неоправданно большим количеством выбросов. Поэтому, прежде чем осуществить поиск оптимального решения, минимизировав при этом количество выбросов, необходимо найти тренд и удалить его из измеренных данных (1).

Задача определения неизвестного тренда состоит в том, чтобы подобрать подходящую аппроксимацию измеренных данных, варьируя имеющийся набор параметров (например, коэффициентов полинома), где тренд строится по некоторому подмножеству $Y_{L,ref} = \{y_{j_1}, \dots, y_{j_L}\}$ из L опорных значений исходного ряда (1). Если данные (1) не содержат грубых измерений, то все N значений этого ряда могут рассматриваться как опорные и использоваться для построения тренда. Если же данные (1) содержат грубые измерения, то необходимо их исключить из числа опорных значений при построении тренда, в противном случае получим искажённую его аппроксимацию и, как следствие, неверное определение выбросов. Таким образом, возникает замкнутый круг. Чтобы найти тренд, необходимо найти все выбросы и удалить их из числа опорных значений. С другой стороны, чтобы найти выбросы, надо построить тренд. Другой замкнутый круг возникает при выборе L – количества опорных значений. Если выберем L достаточно малым, чтобы минимизировать возможность попадания выбросов в набор опорных значений, то построенный тренд может не оказаться достаточно точным. Если же, наоборот, L будет выбрано достаточно большим, то среди опорных значений могут оказаться выбросы. В обоих этих случаях получим искажённую аппроксимацию тренда и неверное определение выбросов.

Поиск тренда в классе степенных полиномов методом минимизирующих наборов заданной длины L . В [14] описана стратегия построения тренда для ряда (1) методом минимизирующих наборов заданной длины L с последующим

определением выбросов. В указанной работе тренд f_j ищется в классе степенных полиномов:

$$P_{n,j}(\mathbf{a}) = a_n(x_j)^n + a_{n-1}(x_j)^{n-1} + \dots + a_0, \quad j = 1, \dots, N, \quad (7)$$

где $n \in \mathbb{N}$, $\mathbf{a} = \{a_0, \dots, a_{n-1}, a_n\} \in \mathbb{R}^{n+1}$ – степень и коэффициенты полинома; $x_j = (t_j - t_1)/(t_N - t_1)$.

Алгоритм поиска тренда основан на аппроксимации измеренных данных (1) полиномом (7), степень и коэффициенты которого подбираются с помощью итерационного процесса. Аппроксимация осуществляется по L опорным значениям, которые выбираются из ряда $\{y_j\}_{j=1}^N$ также в процессе итераций. Число L задаётся заранее так, чтобы выполнялось неравенство $L \leq N - N_{out}$, которое обеспечивает непопадание выбросов в итоговый набор опорных значений на заключительном шаге итерационного процесса. Поскольку количество N_{out} выбросов заранее неизвестно, то L выбирается существенно меньше возможного значения $(N - N_{out})$ так, чтобы указанное неравенство было гарантировано выполнено.

Один шаг итерационного цикла при фиксированной степени n полинома состоит из следующих операций:

поиск коэффициентов $a_0, \dots, a_{n-1}, a_n$ полинома (7) методом наименьших квадратов по L опорным значениям, найденным на предыдущем итерационном шаге (на первом шаге все N значений ряда (1) считаются опорными);

формирование разностей $\hat{y}_j = y_j - P_{n,j}(\mathbf{a})$ и поиск из ряда $\{y_j\}_{j=1}^N$ минимизирующего набора $Y_{L,min} = \{\hat{y}_{j_1}, \dots, \hat{y}_{j_L}\}$ заданной длины L ; при этом минимизирующий набор определяется, как набор $\{\hat{y}_{j_1}, \dots, \hat{y}_{j_L}\}$, для которого СКО минимально из всех возможных наборов длины L , составленных из чисел $\{y_j\}_{j=1}^N$, а СКО определяется стандартным выражением, аналогичным (3), в котором неизвестное среднее z заменено его оценкой z_{Y_L} :

$$z_{Y_L} = L^{-1} \sum_{j \in \{j_1, \dots, j_L\}} \hat{y}_j;$$

переопределение опорных значений $Y_{L,ref} = \{y_{j_1}, \dots, y_{j_L}\}$ в соответствии с найденным минимизирующим набором и переход на следующую итерацию.

Итерации выполняются до достижения сходимости, которая, как доказано в [14], всегда имеет место. При достижении сходимости наборы индексов для $Y_{L,min}$, $Y_{L,ref}$ совпадают с точностью до перестановки. Аппроксимация $\hat{f}_j$ тренда строится по итоговому набору опорных значений $Y_{L,ref}$.

После построения аппроксимации $\hat{f}_j$ тренда для полного решения поставленной в начале статьи задачи к разностям $\hat{y}_j = y_j - \hat{f}_j$ применяется алгоритм поиска оптимального решения $Y_{\Lambda,opt} = \{\hat{y}_{k_1}, \dots, \hat{y}_{k_\Lambda}\}$. В итоге выбросами будут все числа y_j исходного ряда (1), для которых $j \notin \{k_1, \dots, k_\Lambda\}$. Общее количество детектированных выбросов определяется равенством $N_{out} = N - \Lambda$.

Стратегия решения задачи. Описанная в предыдущем разделе стратегия построения тренда и отыскания выбросов даёт адекватный результат только в том случае, если L удовлетворяет неравенству $L \leq N - N_{out}$. В реальной ситуации N_{out} обычно

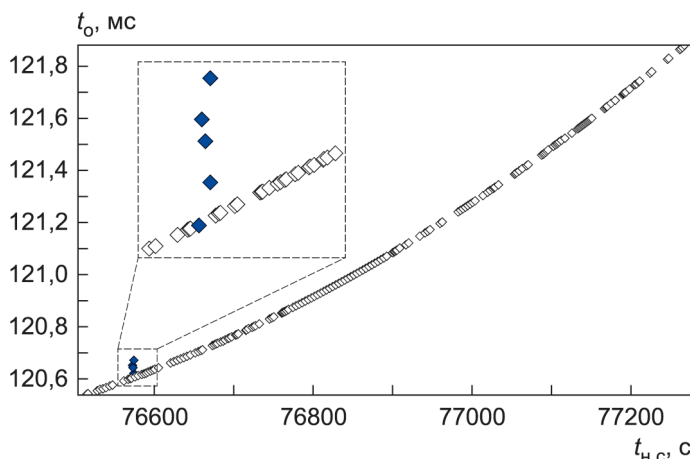


Рис. 1. Данные y_j СЛД-измерений для спутника Galileo201, полученные в 2020 г.

Fig. 1. Data y_j SLR measurements for the Galileo201 satellite obtained in 2020

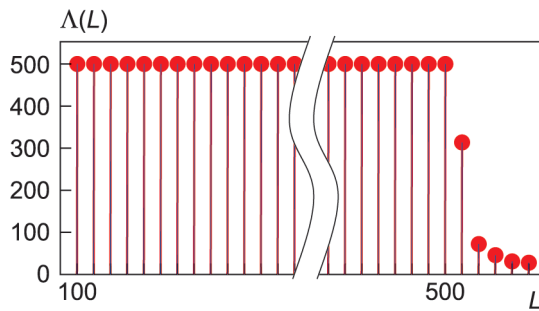


Рис. 2. Зависимость длины Λ найденного оптимального решения от числа L опорных значений, задействованных при построении тренда

Fig. 2. The dependence of the length of the Λ of the found optimal solution on the number L of reference values involved in building the trend

заранее неизвестно, поэтому вопрос о выборе L остается открытым. Необходимо выбрать L так, чтобы с одной стороны минимизировать количество выбросов в найденном решении, а с другой стороны выбрать L максимально возможным, чтобы обеспечить наиболее точную аппроксимацию $\tilde{f}_j$ тренда. Из равенства $N_{out} = N - \Lambda$ следует, что количество выбросов определяется длиной Λ найденного оптимального решения, которая зависит от L – количества опорных значений $\Lambda = \Lambda(L)$. Чем больше Λ , тем меньше число N_{out} обнаруженных выбросов.

Предложенная авторами в настоящей статье стратегия состоит в нахождении максимума зависимости $\Lambda = \Lambda(L)$. Для этого с помощью стратегии из [14] выявляли последовательность чисел $\Lambda(N)$, $\Lambda(N-1)$, ..., $\Lambda(L_{min})$, соответствующих различным значениям L , начинающихся с N , и далее уменьшающихся на единицу до L_{min} – предустановленного минимально допустимого количества опорных значений, используемых для построения тренда. Каждое значение $\Lambda(L)$ получали после выполнения описанной в предыдущем разделе итерационной процедуры построения тренда с последующим отысканием оптимального решения $Y_{\Lambda, opt}$.

Максимум $\Lambda(L)$ находили по формуле

$$\Lambda^* = \max_{L_{min} \leq L \leq N} \Lambda(L). \quad (8)$$

Максимальное значение Λ^* в равенстве (8) может достигаться при нескольких значениях L . Поскольку L ассоциируется с количеством опорных значений, используемых для построения тренда, то из всех значений L , для которых $\Lambda(L) = \Lambda^*$, выбирали максимально возможное и обозначали L^* :

$$L^* = \max\{L : \Lambda(L) = \Lambda^*\}. \quad (9)$$

Указанному значению L^* соответствовало оптимальное решение $Y_{\Lambda^*, opt} = \{\hat{y}_{j_1}, \dots, \hat{y}_{j_{\Lambda^*}}\}$ длины Λ^* . Все числа исходного ряда (1), индексы которых не попадали в набор $\{j_1, \dots, j_{\Lambda^*}\}$, объявляли выбросами. Таким образом, найденными выбросами являлись все значения y_j ряда (1), для которых $j \notin \{j_1, \dots, j_{\Lambda^*}\}$.

Численный пример. Работоспособность предложенной стратегии, выраженной равенствами (8)–(9), проверили на данных СЛД-измерений для спутника Galileo201, полученных

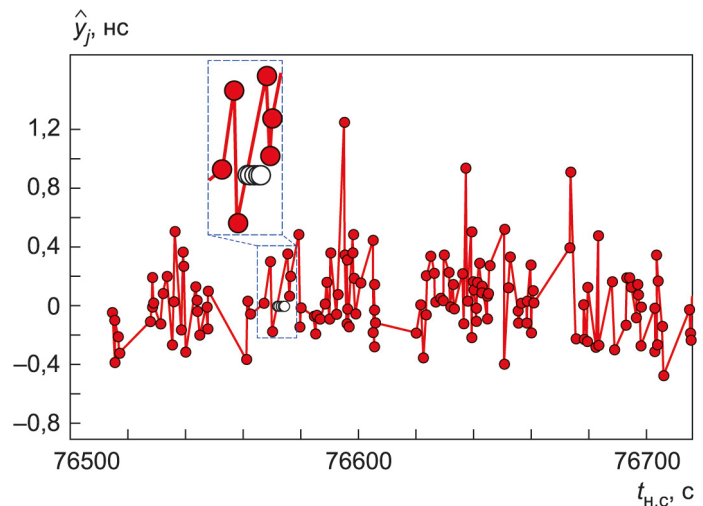


Рис. 3. Остатки, полученные после вычитания тренда из исходных данных

Fig. 3. Residuals obtained after trend subtraction from input data

в 2020 г. Результаты y_j измерений представлены на рис. 1. По вертикальной оси отложено время t_0 прохождения сигнала до спутника и обратно, выраженное в миллисекундах, по горизонтальной оси – время $t_{h,c}$ от начала суток в секундах. Общее количество измерений $N=505$. На левом конце временного интервала – последовательность из пяти выбросов. Поиск выбросов проводили при $\sigma_{max}=0.6$. Аппроксимацию тренда осуществляли полиномом 4-й степени ($n=4$).

Применение к временному ряду предложенной стратегии дало последовательность значений $\Lambda(L)=28, 34, 45, 74, 316, 500, 500, \dots, 500$ при $L=505, 504, 503, 502, 501, 500, 499, \dots, 100$ соответственно.

Зависимость $\Lambda(L)$ представлена на рис. 2. Максимальное значение $\Lambda^*=500$; значения L , при которых достигается Λ^* , – это все числа в диапазоне от 100 до 500, максимальное из них равно $L^*=500$.

На рис. 3 представлены остатки $\hat{y}_j = y_j - P_{4,j}(a)$, где полином $P_{4,j}(a)$ построен по набору $Y_{L^*, ref}$ из $L^*=500$ опорных значений. Соответствующее оптимальное решение состоит также из 500 значений $\hat{y}_j$; $\Lambda^*=500$. Пять из 505 значений исходного ряда, для которых остатки $\hat{y}_j$ не вошли в оптимальное решение, объявлены выбросами. Эпохи обнаруженных выбросов отмечены на рисунке белыми кружками.

Закключение. Разработанная стратегия позволяет исключить необходимость априорного задания количества опорных значений, используемых при построении тренда. Предложенная оптимизация количества опорных значений, выбираемых в результате итераций из ряда измеренных данных, обеспечивает минимальное количество выбросов в найденном решении. Характерной чертой предложенной стратегии является то, что выборка представляется не просто набором случайных чисел (результатов измерений), а характеризуется также моментами времени получения этих данных. Отличие предложенной стратегии от классических статистических схем исключения выбросов и применения методов непараметрической статистики заключается в привязке данных к временной оси.

Использование робастных алгоритмов при поиске оптимального решения в данных со снятым трендом предполагает исключение возможности неоправданной отбраковки какой-либо части данных при высокой надёжности получения результатов.

Список источников

1. International GNSS Service, available at: <http://www.igs.org/network> (accessed: 05.04.2022).
2. Пасынок С. Л., Безменов И. В., Игнатенко И. Ю., Иванов В. С., Цыба Е. Н., Жаров В. Е. Текущие работы ГМЦ ГСВЧ в части определения ПВЗ // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 57. С. 28–33. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.57.28-33>
3. *Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual*, ed. Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P., Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing, 2015. <https://doi.org/10.7892/boris.72297>
4. Безменов И. В., Блинов И. Ю. Теоретические основы построения моделей для описания современных шкал времени и стандартов частоты. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2015. 528 с.
5. Mehlstäubler T. E., Grosche G., Lisdat C., Schmidt P. O., Denker H., *Reports on Progress in Physics*, 2018, vol. 81, no. 6, 064401. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/aab409>
6. GGOS Requirements for Core Sites (Revision 2) Draft 3.4, available at: https://cddis.nasa.gov/docs/2015/SiteRecDoc_Rev2_D3.4.pdf (accessed: 16.04.2022).
7. Blazquez-Garcia A., Conde A., Mori U., Lozano J. A., *ACM Computing Surveys*, 2021, vol. 54, iss. 3, pp. 1–33. <https://doi.org/10.1145/3444690>
8. Fox A. J., Outliers in Time Series, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1972, vol. 34, no. 3, pp. 350–363.
9. Basu S., Meckesheimer M., *Knowl. Inf. Syst.*, 2007, vol. 11, no. 2, pp. 137–154. <https://doi.org/10.1007/s10115-006-0026-6>
10. Mehrang S., Helander E., Pavel M., Chieh A., Korhonen I., *2015 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)*, Washington, DC, USA, 2015, 9–12 November, IEEE, 2015, pp. 1489–1496. <https://doi.org/10.1109/BIBM.2015.7359896>
11. J. Chen, W. Li, A. Lau, J. Cao, and K. Wang, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2010, vol. 1, no. 2, pp. 213–221. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2053052>
12. Безменов И. В., Наумов А. В., Пасынок С. Л. Эффективный алгоритм устранения выбросов из данных измерений глобальных навигационных спутниковых систем // Измерительная техника. 2018. № 9. С. 26–30. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it-2018-9-26-30>
13. Sinclair A. T., *Data Screening and Normal Point Formation, Re-Statement of Herstmonceux Normal Point Recommendation*, available at: https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/data_and_products/data/npt/npt_algorithm.html (accessed: 06.04.22).
14. Bezmenov I. V., Effective Algorithms for Detection Outliers and Cycle Slip Repair in GNSS Data Measurements, ch. 9 in book: *Satellite Systems: Design, Modeling, Simulation and Analysis*, ed.

Tien M. Nguyen, IntechOpen, London, UK, 2021, pp. 177–209. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73789>

References

1. International GNSS Service, available at: <http://www.igs.org/network> (accessed: 05.04.2022).
2. Pasynok S. L., Bezmenov I. V., Ignatenko I. Yu., Ivanov V. S., Tsyba E. N., Zharov V. E., *Transactions IAA RAS*, 2021, iss. 57, pp. 28–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.32876/AplAstron.57.28-33>
3. *Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual*, ed. Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P., Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing, 2015. <https://doi.org/10.7892/boris.72297>
4. Bezmenov I. V., Blinov I. Yu., *Teoreticheskie osnovy postroeniya modelej dlja opisaniya sovremennykh shkal vremeni i standartov chastoty [Theoretical foundations for model construction to describe modern time scales and frequency standards]*, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2015, 528 p. (In Russ.)
5. Mehlstäubler T. E., Grosche G., Lisdat C., Schmidt P. O., Denker H., *Reports on Progress in Physics*, 2018, vol. 81, no. 6, 064401. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/aab409>
6. GGOS Requirements for Core Sites (Revision 2) Draft 3.4, available at: https://cddis.nasa.gov/docs/2015/SiteRecDoc_Rev2_D3.4.pdf (accessed: 16.04.2022).
7. Blazquez-Garcia A., Conde A., Mori U., Lozano J. A., *ACM Computing Surveys*, 2021, vol. 54, iss. 3, pp. 1–33. <https://doi.org/10.1145/3444690>
8. Fox A. J., Outliers in Time Series, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1972, vol. 34, no. 3, pp. 350–363.
9. Basu S., Meckesheimer M., *Knowl. Inf. Syst.*, 2007, vol. 11, no. 2, pp. 137–154. <https://doi.org/10.1007/s10115-006-0026-6>
10. Mehrang S., Helander E., Pavel M., Chieh A., Korhonen I., *2015 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)*, Washington, DC, USA, 2015, 9–12 November, IEEE, 2015, pp. 1489–1496. <https://doi.org/10.1109/BIBM.2015.7359896>
11. J. Chen, W. Li, A. Lau, J. Cao, and K. Wang, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2010, vol. 1, no. 2, pp. 213–221. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2053052>
12. Bezmenov I. V., Naumov A. V., Pasynok S. L., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, pp. 878–884. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1518-y>
13. Sinclair A. T., *Data Screening and Normal Point Formation, Re-Statement of Herstmonceux Normal Point Recommendation*, available at: https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/data_and_products/data/npt/npt_algorithm.html (accessed: 06.04.22).
14. Bezmenov I. V., Effective Algorithms for Detection Outliers and Cycle Slip Repair in GNSS Data Measurements, ch. 9 in book: *Satellite Systems: Design, Modeling, Simulation and Analysis*, ed. Tien M. Nguyen, IntechOpen, London, UK, 2021, pp. 177–209. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73789>

Статья поступила в редакцию 15.04.2022; одобрена после рецензирования 29.04.2022; принята к публикации 30.04.2022. The article was submitted 15.04.2022; approved after 29.04.2022; accepted for publication 30.04.2022.

Влияние кривизны поверхности стандартных образцов кремния на его структурные характеристики

Борис Николаевич Кодесс

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия, kodess@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности четырёхкружных дифрактометров, применяемых для идентификации состава веществ и материалов, а также для определения многих механических, физико-химических и биологических функционально значимых характеристик веществ на арбитражном уровне. При контроле работы и аттестации дифрактометров используется система стандартных образцов дифракционных свойств, включая стандартные образцы параметра кристаллической решётки. В связи с учётом новой квантовой реальности современных технологий уточнены характеристики указанных стандартных образцов. По результатам прецизионных измерений размера элементарной ячейки стандартных образцов дифракционных свойств кремния обнаружено изменение структурных характеристик кремния при изменении диаметра сфер образцов. Этот размерный эффект, найденный впервые в миллиметровом диапазоне, аналогичен эффекту, наблюдаемому при изменении размеров наночастиц кремния и других веществ с различным типом химической связи атомов. Показано, что размерный эффект необходимо учитывать при аттестации стандартных образцов, используемых при испытаниях четырёхкружных дифрактометров. Полученные результаты имеют значение для понимания наносостояния вещества и будут полезны в различных отраслях промышленности – робототехнике, солнечной энергетике, а также при фокусировке лазерных пучков и разработке систем навигации.

Ключевые слова: четырёхкружный дифрактометр, характеристика монокристаллов, прецизионные измерения, искажение кристаллического пространства, кривизна поверхности сфер, кремний, наносостояние вещества, размерный эффект

Для цитирования: Кодесс Б. Н. Влияние кривизны поверхности стандартных образцов кремния на его структурные характеристики // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 35–41. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-35-41>

Благодарности: автор благодарен И. Л. Коммелю за помощь при подготовке образцов, проф. Ф. А. Сидоренко и П. Б. Кодессу за подробное обсуждение результатов.

Influence of surface curvature of silicon reference materials on its structural characteristics

Boris N. Kodess

Russian Research Institute for Metrological Service, Moscow, Russia, kodess@mail.ru

Abstract. The features of four-circle diffractometers, which are used to identify the composition of substances and materials, as well as to determine many mechanical, physico-chemical and biologically functionally significant characteristics of substances at the arbitration level, are considered. When monitoring the operation and certification of these measuring systems, a system of certified reference materials (CSRM) of diffraction properties, including, including the CSRM of the crystal lattice parameter, is used. The characteristics of this and other CSRMs are specified in this work in connection with the need to use the results of measurements on diffractometers, taking into account the new quantum reality of modern technologies. According to the results of precision measurements of the unit cell size of standard samples of the diffraction properties of silicon CSRM, a change in the structural characteristics with a change in the diameter of the spheres of the samples was found. This size effect, found for the first time in the millimeter range, is similar to the effect observed when changing the size of silicon nanoparticles and other substances with different types of chemical bonding of atoms. It is shown that the size effect must be taken into account when certifying standard samples used in testing four-circle diffractometers. The results are also important for understanding the nanostate of the analyte surface and will be useful in various industries.

Keywords: diffractometers for characterizing single crystals, high-precision measurements, curvature of spheres, surface influence, nanostate of substance, Silicon size effect

Acknowledgments: the author is grateful to I. L. Kommel for his help in preparing the samples, prof. F. A. Sidorenko and P. B. Kodess for a detailed discussion of the results.

Введение. Материалы для современных устройств разрабатываются по уточнённой технологической цепочке «состав – структура – дисперсность – свойства». Материалы для

газотурбинных, робототехнических устройств, как и для многих устройств электроники и солнечной энергетики, имеют монокристаллическую форму. В отличие от поликристаллов

в монокристаллах действует более строгий порядок строения кристаллической решётки, а именно отсутствуют высокоугловые границы и дефекты многих типов, присущие поликристаллическим материалам, что позволяет более надёжно выявлять управляющие параметры формирования функционально значимых характеристик. На всех этапах разработки материалов необходимую и наиболее полную информацию арбитражного уровня дают результаты, полученные с помощью дифрактометров. Монокристаллическая форма вещества обеспечивает повышение интенсивности отражённого излучения на несколько порядков в дифрактометрических измерительных системах, что позволяет анализировать даже небольшие образцы.

Среди различных дифрактометров для характеристики монокристаллов особое место занимают четырёхкружные дифрактометры. Гониометры, входящие в конструкцию дифрактометров такого типа, обеспечивают несколько степеней свободы вращения образца. Таким образом, можно отдельно получать данные всех эквивалентных отражений для семейства атомных плоскостей с разными знаками и перестановкой индексов Миллера в каждой группе, что существенно увеличивает надёжность и воспроизводимость результатов измерений. В дифрактометрах этого типа достигаются высокие монохроматизация и коллимация падающего пучка рентгеновских лучей, что также позволяет повысить точность измерения углового распределения интенсивности отражений. Другим важным отличием процесса анализа монокристаллических образцов от поликристаллических в этих устройствах является возможность собирать данные со всего объёма образцов, а не только с поверхностных или приповерхностных слоёв.

Дифрактометры – сложные наукоёмкие и автоматизированные измерительные системы, в которых функционально объединены средства измерений (СИ), средства вычислительной техники и вспомогательные устройства для получения сигналов измерительной информации о физических величинах. Особенность дифрактометров состоит в том, что они включают несколько устройств, причём контроль работы каждого из них связан с разными единицами измерений, отражающими разные управляемые характеристики (шаг поворота гониометров в разных направлениях, температура, напряжение). Все характеристики фиксируются во время эксперимента для учёта и введения при необходимости соответствующих поправок.

Стартовая измерительная модель зависит от первоначальной цели. При высокоточных экспериментах для формирования цели необходим анализ литературных источников, которые, как правило, представляют разноречивые сведения, требующие уточнения значений различных физических величин для характеристики материала в проводимом эксперименте. Также в стартовой модели должны быть учтены форма и совершенство кристаллической структуры образца. В четырёхкружных дифрактометрах можно задавать условия эксперимента, отражающие полную, высокоточную и достоверную модель строения вещества. Позиция нуля на шкале гониометра определяется путём калибровки. Технически (согласно процедуре) для установления соответствия стартовой

модели качеству анализируемого образца с уточнением этой модели обычно проводится пробный короткий эксперимент. В ходе эксперимента, когда получено более половины заданного массива данных с набором половины возможных эквивалентов отражений, массив для обработки передаётся на другой компьютер, после чего может быть дано дополнительное задание для улучшения статистических показателей. После обработки больших массивов данных определяются характеристики, также описываемые разными единицами измерений, – состав, размер элементарной ячейки, координаты атомов, дефекты (тип и количество вещества, его распределение по координатам в элементарной ячейке, тип и число дефектов различного уровня, нарушающих строгий порядок в начальной модели строения и др.). Поэтому дифрактометрические методы относят к смешанным видам измерений.

Результаты характеристики монокристаллов четырёхкружными дифрактометрами зависят от точности и полноты определения значений различных характеристик дифракционной картины и связаны с особенностями строения вещества, основанными на различных закономерностях, которые описывают научно-технологическую цепочку «состав – структура – дисперсность – свойства». Глубина и качество характеристик – элементов цепочки – определяется используемыми первоначальными измерительными моделями. Существенен также анализ влияния внешних факторов и последующих моделей, необходимых для определения структурных характеристик на разных уровнях (масштабах) строения.

Контроль работы дифрактометров основан на применении стандартных образцов (СО) дифракционных свойств [1–4]. В США (NIST) и России (ВНИИМС) разработано более 12 типов СО дифракционных свойств с разными видами их характеристик. В NIST и ВНИИМС созданы эталонные СИ – СО дифракционных свойств монокристаллов. Во ВНИИМС разработан СО на основе сфер диоксида кремния (α -кварца). При разработке учитывали результаты тестовых измерений четырёхкружным дифрактометром КМ-4. Последующая аттестация проводилась по итогам межлабораторного эксперимента. В этом эксперименте принимали участие лаборатории организаций Российской академии наук и отраслевых институтов, при измерениях использовали четырёхкружные дифрактометры различных типов.

Также во ВНИИМС разработан и аттестован и новый тип СО дифракционных свойств – ГСО 9575-2010 ПРФ-4(3) – кремний, включающий сферы из высокочистого монокристалла кремния. Однако результаты определения параметров кристаллической решётки дисперсных порошковых препаратов, приготовленных из этих же монокристаллов, заметно отличаются от данных, полученных для исходных монокристаллических пластин при сохранении достигнутой точности измерений, и от данных межлабораторных экспериментов. Аналогичное различие данных наблюдалось и для разных партий СО мелкокристаллического кремния, аттестованных в NIST [4, 5]. Эта разница значений параметров решётки для массивных монокристаллов и дисперсных образцов до сих пор не получила какого-либо объяснения.

При высокоточных измерениях для характеристики состава и размера элементарной ячейки веществ с применением четырёхкружных дифрактометров анализируемые образцы имеют вид сферы. Такая форма позволяет точнее учитывать многие поправки в интенсивности фиксируемых отражений на дифракционной картине. Кроме того, образцы в виде шара с подготовленной сферической поверхностью более компактны. Это позволяет увеличивать облучаемый объём, повышать чувствительность при измерениях слабых отражений в высокоугловой области, где высока точность определения параметров решетки, и проводить прецизионные измерения даже очень небольших анализируемых образцов. Многие современные кристаллические изделия, используемые в научных и в прикладных областях, также имеют форму сферы или полусферы, их функциональные характеристики зависят от состояния поверхности.

Сферическая поверхность и структурные характеристики кристаллических изделий могут искажаться. Однако автор настоящей статьи не нашёл в литературе информации о связи различных значений параметров решётки СО с искажением кристаллической структуры в результате увеличения кривизны поверхности монокристаллических изделий. Понятие кривизны известно очень давно. Её роль и математическое описание было проработано ещё К. Ф. Гауссом, который установил связь степени кривизны поверхности образцов шаровидной формы с их размером.

Цель настоящей работы – измерить размеры элементарной ячейки монокристаллических образцов из партии стандартных образцов дифракционных свойств ГСО 9575-2010 ПРФ-4(3) – кремний с различным размером сферы и проанализировать влияния кривизны на состояние поверхности этих кристаллических материалов.

Измерение размеров элементарной ячейки кремния в миллиметровом диапазоне четырёхкружными дифрактометрами. Максимальный размер образца определяется диаметром коллиматора дифрактометра. В настоящих исследованиях использована установка XCalibur (Oxford Diffraction – Rigaku, Япония) с коллиматором диаметром 0,5 мм. Минимальный размер образца зависит от чувствительности используемого высокочувствительного детектора, а также от числа и типа рассеивающих центров-атомов в анализируемых материалах. Методики пробоподготовки, выполнения высокоточных экспериментов, обработки больших массивов данных, которые образуются в результате полных экспериментов на четырёхкружных дифрактометрах, подробно описаны в [6, 7] и являются частью общего подхода для дифрактометрических работ с кристаллическими веществами [8].

Заготовки кубической формы изготовлены из пластин высокочистого монокристалла кремния из партии для ГСО 9575-2010 ПРФ-4(3) – кремний. Затем из этих заготовок получены шары различного диаметра в цилиндрических камерах, на стенки которых наклеены абразивные шкурки с алмазным покрытием. Под воздействием потока воздуха заготовки, перемещаясь внутри камеры, изменяют форму с кубической на сферическую. Изготовлены два шаровидных образца с большим разбросом диаметров сферы (0,43

и 0,06 мм) и, следовательно, с существенно различной кривизной поверхности и кристаллического пространства.

Образцы размещают на малой гониометрической головке дифрактометра, установленной на большой гониометр. В результате юстировки образец попадает максимально точно в центр (пересечение всех осей) гониометра (отклонение составляет не более 5–10 мкм). Конструкция большого гониометра дифрактометра обеспечивает диапазон возможных последовательных поворотов детектора 0–120°. Образец поворачивают последовательно с шагом 0,5° таким образом, чтобы очень плотно заполнить пространство внутри сферы Эвальда и, следовательно, всё пространство элементарной ячейки. Использовано проникающее коротковолновое монохроматизированное MoK α 1-излучение, позволяющее анализировать весь объём образца.

Длительность эксперимента для образца диаметром 0,43 мм очень большая по сравнению с обычными экспериментами и составляет 66 ч. Благодаря высокой интенсивности отражённого излучения для кремния напряжение рентгеновской трубки понижено с 50 до 33 кВ, чтобы исключить появление отражений от второй гармоники падающего излучения. Температура поддерживается на уровне (298,0 $\pm$ 0,2) К на протяжении всех измерений.

В эксперименте записано 6196 фреймов, разделённых по угловым характеристикам дифракционной картины на 32 сектора. В зависимости от интенсивности возникающих брэгговских отражений, различных в каждом угловом диапазоне, время экспозиции на каждом шаге поворота гониометра с образцом варьируется, составляя 30 с при высоких углах. Это обеспечивает высокую надёжность при анализе угловых позиций отражений в этом высокоугловом диапазоне, наиболее благоприятном для высокоточного определения параметра кристаллической решётки (размера элементарной ячейки). Всего в этом эксперименте при изучении дифракционной картины обнаружено 8791 отражений, соответствующих элементарной ячейке кремния с кубической симметрией (пространственная группа Fd3m). Число независимых наборов отражений составляет от 6 до 48 групп, в зависимости от индексов Миллера для этих отражений. Сопоставление результатов между указанными группами обеспечивает высокую воспроизводимость результатов каждого эксперимента.

Диаметр второго образца для исследований составляет 0,06 мм. Использованы те же гониометрическая головка и рентгеновская трубка с теми же параметрами излучения, что и при исследовании первого образца. Однако из-за заметного уменьшения анализируемого объёма образца уменьшена интенсивность отражённого излучения. В связи с этим увеличено время экспозиции на каждом шаге, и время проведения эксперимента составило 160 ч непрерывно, что обеспечило необходимую статистику при наборе импульсов для определения координат максимумов каждого рефлекса.

Чтобы учитывать возможный временной дрейф, через каждые 50 фреймов записаны одни и те же два контрольные рефлекса. Повышенная стабильность высокого напряжения рентгеновской трубки (изменение напряжения составило не более одной десятой вольта при 32 кВ) достигнута

путём использования дополнительных стабилизирующих источников питания. Наиболее слабые по интенсивности, сравнимые с фоном, отражения для этого образца исключены программой обработки фреймов с дифракционной картиной. Параметры решётки каждого монокристаллического образца на последнем этапе обработки массива данных уточнены последовательно: сначала определено значение параметра по всему массиву данных до полной сходимости результатов после нескольких циклов уточнений, затем проведено несколько дополнительных циклов уточнений по массиву данных в высокоугловом диапазоне.

Результаты измерений двух образцов – изменение параметров кристаллической решётки образцов с различной кривизной в кристаллическом пространстве (по Гауссу степень кривизны k описывается обратным квадратом радиуса R сферы) – обобщённые для всех независимых групп с разными индексами Миллера, приведены в таблице, где d_c – диаметр сферы; a – параметр решётки; полужирным шрифтом показана разность значений.

Обсуждение результатов. Дополнительное повышение точности измерений четырёхкружными дифрактометрами позволило впервые наблюдать в настоящем исследовании изменение размеров элементарной ячейки кремния в миллиметровом диапазоне, которое имеет экспоненциальный характер.

В проведённых в настоящей работе полных экспериментах последовательно зафиксированы все возможные отражения, в отличие от нередко используемого короткого набора данных, когда анализируется только один или два набора возможных эквивалентов. Также это является существенным отличием используемой методики измерения от ускоренных подходов к измерениям характеристик монокристаллов дифрактометрами этого типа, когда анализируется обычно только часть возможных для монокристаллов отражений, соответствующих независимой части из возможных эквивалентов в сфере Эвальда. Короткий набор при традиционных измерениях даёт только общее представление о типе и размерах элементарной ячейки. Многократное увеличение числа данных в обоих выполненных в настоящем исследовании экспериментах по сравнению с измерениями с применением соответственно порошковых дифрактометров или пластин заметно повышало точность характеристик дифракционной картины. При этом учтены случайные погрешности, связанные с инструментальными особенностями рентгенографирования в данной геометрии оптической схемы четырёхкружного дифрактометра, а также с детектированием дифракционной картины и последующей обработкой образующихся больших массивов данных.

Результаты измерений параметра кристаллической решётки образцов

d_c , мм	a , нм	R^2 , мм	k^{-2} , мм
0,06	0,543381 (3)	0,0009	1111
0,43	0,543176 (2)	0,0462	22
0,37	0,000205	0,0451	1089

Обнаруженное заметное различие параметров кристаллической решётки двух исследованных образцов (размерный эффект) на два порядка превышает статистическую погрешность. Кроме того, оба образца измерены на одной и той же установке с использованием одной рентгеновской трубки, что также обусловило высокую точность и надёжность результатов для изучения относительных изменений параметра решётки при уменьшении размера шара и изменении кривизны его сферы.

Влияние размера анализируемых образцов на их физические свойства является предметом исследования в течение длительного времени [9–11]. Переход к ультрадисперсному состоянию вещества или мелкодисперсные включения в матрице приводят к увеличению прочности и изменению многих других функциональных характеристик материалов [11–14]. Для выделенных из множества ультрадисперсных веществ материалов с размерами частиц менее 100 нм увеличение доли поверхности по отношению к объёму используется в гипотезах объяснения уникальных свойств вещества в наносостоянии. В то же время прямые рентгеновские методы исследования геометрических и термодинамических характеристик наноматериалов имеют ограничения по точности результатов экспериментального основания или подтверждения гипотез. Это связано с большим числом различных влияющих факторов, включая физические (аномальное уширение брэгговских отражений и др.) и инструментальные (когда измерения проводятся непосредственно в нижнем диапазоне размеров наночастиц) ограничения.

Важно отметить, что для малых частиц в виде порошков при измерениях в нанометровом диапазоне размеров [15] наблюдается аналогичное и ещё более сильное изменение параметров кристаллической решётки кремния и других элементов и химических соединений на их основе. Обнаружение аналогичного размерного эффекта в миллиметровом диапазоне может быть использовано для понимания аналогичной природы (механизма) существующего различия данных для одного и того же вещества в виде монокристаллов и порошков. Для получения более усреднённой картины и правильного описания профилей брэгговских отражений поликристаллы рентгенографируют, как правило, в измельчённом виде с частицами размером от нескольких единиц до десятков микрометров. В результате комбинации процессов дилатации решётки и уширения брэгговских отражений определяемые угловые позиции смещаются. Это изменяет измеряемые значения параметров решётки таких поликристаллических объектов. Данное изменение наиболее заметно для часто используемого начала углового диапазона, особенно при фазовом анализе поли- и монокристаллов [16–19].

Многочисленные гипотезы существования размерных эффектов и теории состояния вещества в нанометровом диапазоне до сих пор не имели надёжного экспериментального подтверждения прямыми рентгеновскими методами из-за большого числа различных влияющих факторов. В результате точность измерений характеристик дифракционной картины в нанометровом диапазоне размера образцов,

особенно в малоугловой области, на два-три порядка ниже, чем в используемом автором настоящей статьи миллиметровом диапазоне.

Достигнутое значительное повышение точности результатов измерений в миллиметровом диапазоне четырёх-круговыми дифрактометрами по сравнению с аналогичными данными для порошков в нанометровом диапазоне размеров позволяет считать, что результаты для монокристаллов с различными размерами сфер обеспечат более полное выявление основных механизмов появления размерных эффектов и в нанометровом диапазоне размеров частиц.

Кривизна поверхности сферы меньшего образца (диаметром 0,06 мм) и возникающие искажения в пространстве кристаллической решётки на поверхности образцов намного выше, чем для образца размером 0,43 мм, также заметно увеличение параметра решётки (см. таблицу). Можно предположить, что «оборванные» химические связи на поверхности образца с увеличением её кривизны повышают амплитуду колебаний атомов с такими связями и могут привести к реконструкции данных связей. Это хорошо согласуется с тем, что мягкие моды колебаний атомов элементарной ячейки сопровождаются увеличением каталитической активности и процессами самоорганизации на поверхности кристаллов [20]. Среди других гипотез наблюдаемого размерного эффекта следует отметить изменение зарядового состояния химических связей.

Наблюдаемый размерный эффект для макроразмерных образцов, используемых в практике дифрактометрических измерений, представляет интерес с фундаментальной и прикладных точек зрения на строение и свойства кристаллических сфер.

Высокая кривизна и искажения, возникающие в пространстве кристаллической решётки, установлены также при сильной пластической деформации, особенно для изделий из веществ с металлическим типом химической связи [21, 22].

В природе искривление формы кристаллов и сопровождающие явления наблюдаются для веществ многих типов при росте кристаллов в условиях различной окружающей среды [23]. Например, некоторые формы элементарной ячейки и кристаллов биоактивного селена напоминают спиральную структуру ДНК. Для этого элемента также найден размерный эффект [24], который наблюдается для кремния и других элементов. Более подробные исследования обнаруженного размерного эффекта и сопровождающих явлений в веществах с различным типом химической связи позволят выявить общность его влияния на характеристики наносостояния материалов, где вклады поверхностных явлений усиливаются многократно.

Использование аттестованных образцов и методик измерения повышает точность и достоверность результатов. В прикладной метрологии изучение размерного эффекта важно для характеристики СО дифракционных свойств монокристаллов и идентификации биоактивных материалов [18, 24]. Кремний применяется не только как материал для изделий полупроводниковой электроники, качество которых контролируют методами рентгеновской монокристаллической дифрактометрии, в том

числе при анализе кривизны поверхности изделий, но и является важным конструкционным материалом, поскольку обладает превосходными механическими характеристиками [25]. Полусферы и сферы из монокристаллического кремния давно используются при изготовлении навигационно-измерительных устройств, включая недорогие высокопроизводительные датчики и преобразователи, которые легко соединяются с микропроцессорами [26, 27]. Применение кремниевых нанонитей определяет возможности создания нового поколения микромеханических сенсоров и актюаторов. Кремниевые полусферы и изогнутые монокристаллы являются компонентами устройств солнечной энергетики [28], а также служат в качестве фокусирующих монохроматоров и коллиматоров, входящих в состав различных рентгенооптических и лазерных систем. Наноразмерные сферы и нити из кремния используются в различных актуальных биомедицинских и других устройствах.

Заключение. Высокая точность полученных автором настоящей статьи экспериментальных данных – измеренных параметров кристаллической решетки (размеров элементарной ячейки вещества) образцов кремния с различной кривизной поверхности сфер – позволила обнаружить размерный эффект. Для прикладных применений, когда требуется прецизионная точность результатов измерений, необходимо вводить размерный фактор. Особенно это значимо при аттестации стандартных образцов дифракционных свойств при измерениях с использованием четырёхкруговых дифрактометров. Для материаловедения подробное исследование размерного эффекта более детально позволит выявить механизмы формирования функциональных характеристик изделий сферической формы, применяемых в различных современных индустриях, а также уточнить природу особенностей наноразмерного состояния.

Список источников

1. Wong-Ng W. et al., *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2001, vol. 106, no. 6, 1071. <https://doi.org/10.6028/jres.106.058>
2. Кодеес Б. Н. Метрологическое обеспечение высокоточных измерений характеристик ключевых материалов современных технологий и их стандартные образцы состава и свойств // *История науки и техники*. 2010. № 9. С. 29–36.
3. Kodess B., et al., *Meeting Report, Neutron News*, 2009, vol. 20, iss. 3, p. 4. <https://doi.org/10.1080/10448630903114026>
4. Hubbard C. R., *Journal of Applied Crystallography*, 1983, vol. 16, no. 3, pp. 285–288. <https://doi.org/10.1107/S0021889883010456>
5. Yoder-Short D., *Journal of Applied Crystallography*, 1993, vol. 26, no. 2, pp. 272–276. <https://doi.org/10.1107/S0021889892011610>
6. Кодеес Б. Н., Лазукина О. П., Волкова Е. Н., Малышев К. К. Примесный состав и параметры кристаллической решетки высокочистого α -Mn // *Неорганические материалы*. 2020. Т. 56. № 5. С. 538–543. <https://doi.org/10.31857/S0002337X20050073>

7. Кодесс Б. Н., Сидоренко Ф. А. Анизотропия магнитной восприимчивости силицида V_3Si // Физика металлов и металловедение. 2021. Т. 122. № 4. С. 370–376. <https://doi.org/10.31857/S0015323021040033>

8. Белозеров Ю. С., Князев А. В., Кодесс Б. Н., Шипилова А. С., Стешин М. О., Трошин О. Ю., Буланов А. Д. Линейный коэффициент теплового расширения железа различного изотопного состава // Неорганические материалы. 2021. Т. 57. № 11. С. 1202–1206. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21110026>

9. Морохов И. Д., Петин В. И., Трусов Л. И., Петрунин В. Ф. Структура и свойства малых металлических частиц // Успехи физических наук. 1981. Т. 133. № 4. С. 653–692. <https://doi.org/10.3367/UfNr.0133.198104c.0653>

10. Зубов В. И. Некоторые размерные эффекты и свойства ультрадисперсных систем // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева. 1991. Т. 36. № 2. С. 133–137.

11. Филиппов М. А., Кодесс Б. Н. Об изменении тонкой структуры марганцовистых сталей под влиянием ударных волн высокого давления // Физика металлов и металловедение. 1971. Т. 31. № 1. С. 172–176.

12. Kodess B., Kodess P., Investigation of nanostructure materials for developing new x-ray reference materials, *Proceedings of the Denver X-ray Conference*, ICDD, 2015, vol. 59, pp. 243–254.

13. Aleksyeyev P. et al., *Acta Physica Polonica A*, 2006, vol. 4, no. 109, pp. 555–559. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.109.55>

14. Nabialek A., et al., *Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 105 (6), 063918. <https://doi.org/10.1063/1.3093696>

15. Gamarnik M. Y., *Physica status solidi (b)*, 1990, vol. 161, iss. 2, pp. 457–462. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221610202>

16. Кодесс Б. Н., Кузин А. Ю. Оценка соответствия заявляемым характеристикам дифрактометров для определения фазового состава веществ и материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 12. С. 61–70. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2017-83-12-61-70>

17. Кодесс Б. Н., Сарин В. А. Нейтронный дифрактометр для определения структурных характеристик монокристаллов // Измерительная техника. 2014. № 11. С. 51–54.

18. Kodess B. N., et al., Metrological assurance of the quality control of pharmaceutical production using XRD methods, *Proceeding the 8th Pharmaceutical X-ray Diffraction Symposium*, 4–7 May 2009, Glasgow, Scotland, UK, pp. 9–10.

19. Medetbekov M. T. et al., Phase transitions, elastic constants and electron distribution in KDP-family, *Acta Crystallographica. Section A: Foundations of Crystallography*, 1999, vol. 55, p. 61.

20. Kodess B., Kodess P., *Materials Research Proceedings*, 2022, vol. 21, pp. 259–263. <https://doi.org/10.21741/9781644901755-46>

21. Тюменцев А. Н., Дитенберг В. А., Коротаев, А. Д., Денисов К. И. Эволюция кривизны кристаллической решетки в металлических материалах на мезо и наноструктурном уровнях пластической деформации // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16. № 3. С. 63–79.

22. Панин В. Е. и др. Фундаментальная роль кривизны кристаллической структуры в пластичности и прочности твердых тел // Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17. № 6. С. 7–18.

23. Vitelli V., Lucks J. B., Nelson D. R., *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, vol. 103, no. 33, pp. 12323–12328. <https://doi.org/10.1073/pnas.0602755103>

24. Суханов М. В. и др. Теплофизические свойства и кристаллическая структура особо чистого моноизотопного ^{80}Se // Доклады Академии наук. 2016. Т. 466. № 3. С. 302–305. <https://doi.org/10.7868/S0869565216030154>

25. Petersen K. E., *Proceedings of the IEEE*, 1982, vol. 70, no. 5, pp. 420–457. <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12331>

26. Pogorelov V. A., Sokolov S. V., *Cosmic Research*, 2015, vol. 53, no. 6, pp. 458–468. <https://doi.org/10.1134/S0010952515060040>

27. Шебашаевич В. С., Дмитриев П. П., Иванцевич Н. В. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.

28. Tsakalakos L., Balch J., Fronheiser J., Korevaar B. A., Sulima O., Rand J., *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 91, no. 23, 233117. <https://doi.org/10.1063/1.2821113>

References

1. Wong-Ng W. et al., *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2001, vol. 106, no. 6, 1071. <https://doi.org/10.6028/jres.106.058>

2. Kodess B. N. Metrological assurance of high-accuracy measurements of key materials characteristics for modern technology and their certified reference materials of composition and properties, *History of Science and Engineering*, 2010, no. 9, pp. 29–36. (In Russ.)

3. Kodess B., et al., *Meeting Report, Neutron News*, 2009, vol. 20, iss. 3, p. 4. <https://doi.org/10.1080/10448630903114026>

4. Hubbard C. R., *Journal of Applied Crystallography*, 1983, vol. 16, no. 3, pp. 285–288. <https://doi.org/10.1107/S0021889883010456>

5. Yoder-Short D., *Journal of Applied Crystallography*, 1993, vol. 26, no. 2, pp. 272–276. <https://doi.org/10.1107/S0021889892011610>

6. Kodess B. N., Lazukina O. P., Volkova E. N. et al., *Inorganic Materials*, 2020, vol. 56, pp. 512–517. <https://doi.org/10.1134/S0020168520050076>

7. Kodess B. N., Sidorenko F. A., *Physics of Metals and Metallography*, 2021, vol. 122, no. 4, pp. 345–350. <https://doi.org/10.1134/S0031918X21040037>

8. Belozеров Y. S., et al., *Inorganic Materials*, 2021, vol. 57, pp. 1135–1139. <https://doi.org/10.1134/S0020168521110029>

9. Morokhov I. D., Petinov V. I., Trusov L. I., Petrunin V. F., *Sov. Phys. Usp.*, 1981, vol. 24, no. 4, pp. 295–317. <https://doi.org/10.1070/PU1981v024n04ABEH004800>

10. Zubov V. I., Some nano-size effects and properties of ultradispersive systems, *Zhurnal Vsesoyuznogo himicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva*, 1991, vol. 36, pp. 133–136. (In Russ.)

11. Filippov M. A., Kodess B. N., Influence of high-pressure shock waves on the fine structure of manganese steel, *Physics of Metals and Metallography*, 1971, vol. 31, no. 1, pp. 171–175. (In Russ.)

12. Kodess B., Kodess P., Investigation of nanostructure materials for developing new x-ray reference materials, *Proceedings of the Denver X-ray Conference*, ICDD, 2015, vol. 59, pp. 243–254.
13. Aleksyeyev P. et al., *Acta Physica Polonica A*, 2006, vol. 4, no. 109, pp. 555–559. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.109.55>
14. Nabialek A., et al., *Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 105 (6), 063918. <https://doi.org/10.1063/1.3093696>
15. Gamarnik M. Y., *Physica status solidi (b)*, 1990, vol. 161, iss. 2, pp. 457–462. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221610202>
16. Kodess B. N., Kuzin A. Y., *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2017, vol. 83 (12), pp. 61–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2017-83-12-61-70>
17. Kodess B. N., Sarin V. A., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 57, no. 11, pp. 1299–1303. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0624-3>
18. Kodess B. N., et al., Metrological assurance of the quality control of pharmaceutical production using XRD methods, *Proceeding the 8th Pharmaceutical X-ray Diffraction Symposium*, 4–7 May 2009, Glasgow, Scotland, UK, pp. 9–10.
19. Medetbekov M. T. et al., Phase transitions, elastic constants and electron distribution in KDP-family, *Acta Crystallographica. Section A: Foundations of Crystallography*, 1999, vol. 55, p. 61.
20. Kodess B., Kodess P., *Materials Research Proceedings*, 2022, vol. 21, pp. 259–263. <https://doi.org/10.21741/9781644901755-46>
21. Tyumentsev A. N. et al., *Physical Mesomechanics*, 2013, vol. 16, no. 4, pp. 319–334. <https://doi.org/10.1134/S1029959913040061>
22. Panin V. E. et al., *Physical Mesomechanics*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 89–99. <https://doi.org/10.1134/S1029959915020010>
23. Vitelli V., Lucks J. B., Nelson D. R., *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, vol. 103, no. 33, pp. 12323–12328. <https://doi.org/10.1073/pnas.0602755103>
24. Sukhanov M. V. et al., *Doklady Chemistry*, 2016, vol. 466, no. 1, pp. 11–14. <https://doi.org/10.1134/S0012500816010079>
25. Petersen K. E., *Proceedings of the IEEE*, 1982, vol. 70, no. 5, pp. 420–457. <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12331>
26. Pogorelov V. A., Sokolov S. V., *Cosmic Research*, 2015, vol. 53, no. 6, pp. 458–468. <https://doi.org/10.1134/S0010952515060040>
27. Shebashaevich V. S. et al., *Setevye sputnikovye radionavigacionnye sistemy*, Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993, 408 p. (In Russ.)
28. Tsakalakos L., Balch J., Fronheiser J., Korevaar B. A., Sulima O., Rand J., *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 91, no. 23, 233117. <https://doi.org/10.1063/1.2821113>

Статья поступила в редакцию 14.02.2022; одобрена после рецензирования 15.04.2022; принята к публикации 17.04.2022.
The article was submitted 14.02.2022; approved after reviewing 15.04.2022; accepted for publication 17.04.2022.

Научная статья

УДК 681.5.017

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-42-49>

Теоретическая оценка работоспособности регулируемого электропривода координатной системы лазерной установки

Михаил Владимирович Мостовской^{1✉}, Владимир Владимирович Слепцов²,
Александр Борисович Снедков³

^{1, 2, 3} МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия, ¹mvmost@yandex.ru, ²vsleptsov@gmail.com,
³snedkov@mirea.ru

Аннотация. Освещены вопросы повышения надёжности координатных систем лазерных установок в составе станков с числовым программным управлением. Согласно ГОСТ 27803-91 «Электроприводы регулируемые для металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов. Технические требования» выполнена теоретическая оценка работоспособности регулируемого электропривода с повышенными показателями надёжности в составе координатной системы лазерной установки. Приведены методика расчёта параметров регулятора положения лазерного инструмента и обобщённая математическая модель электромеханической схемы лазерной установки. Кинематическая схема выполнена на базе бесколлекторного двигателя постоянного тока и шариковинтовой пары. Представленные результаты моделирования соответствуют требованиям п. 2.5.7 ГОСТ 27803-91 и могут быть полезны специалистам-разработчикам информационно-измерительных и управляющих систем лазерных установок.

Ключевые слова: информационно-измерительная и управляющая система, лазерная установка, следящий электропривод, координатная система, бесколлекторный двигатель постоянного тока, схемотехническое моделирование

Благодарности: авторы выражают благодарности профессорскому составу РТУ МИРЭА Шкатову Петру Николаевичу и Артемовой Светлане Валерьевне за ценные рекомендации и замечания при написании настоящей статьи.

Для цитирования: Мостовской М. В., Слепцов В. В., Снедков А. Б. Теоретическая оценка работоспособности регулируемого электропривода координатной системы лазерной установки // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 42–49. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-42-49>

Theoretical assessment of the operability of a controlled electric drive as part of the coordinate system of a laser installation

Mikhail V. Mostovskoy^{1✉}, Vladimir V. Sleptsov², Alexander B. Snedkov³

^{1, 2, 3} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, ¹mvmost@yandex.ru, ²vsleptsov@gmail.com, ³snedkov@mirea.ru

Abstract. In this paper, presents the issues of increasing the reliability of the coordinate systems of laser systems as part of machine tools with numerical control. According to GOST 27803-91 "Adjustable electric drives for metalworking equipment and industrial robots. Technical Requirements" a theoretical assessment of the performance of a controlled electric drive with increased reliability indicators as part of the coordinate system of a laser installation was carried out. A method for calculating the parameters of the laser tool position controller and a generalized mathematical model of the electromechanical circuit of the laser facility are presented. The kinematic scheme is based on a brushless DC motor and a ball screw pair. The presented simulation results comply with the requirements of clause 2.5.7 of GOST 27803-91 and may be useful to developers of information-measuring and control systems for laser installations.

Keywords: information-measuring and control system, laser installation, servo drive, coordinate system, brushless DC motor, circuit simulation

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the professorial staff of the RTU MIREA Petr N. Shkatov and Svetlana V. Artemova for valuable recommendations and comments when writing this paper.

Введение. Обеспечение и повышение качества технологических машин является одним из главных направлений развития современного станкостроения. В настоящее время на многих промышленных предприятиях, относящихся к гражданскому и военно-промышленному комплексу России, проводятся технологические операции на оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ). На станках с ЧПУ программа обработки деталей реализуется в числовом формате, т. е. траектория движения режущего инструмента относительно обрабатываемой детали задаётся в виде ряда последовательных положений, определяемых числовым

значением той или иной координаты. К показателям качества станков с ЧПУ, требующим постоянного совершенствования, относятся точность, производительность, виброустойчивость. Необходимо также совершенствовать конструкции координатных систем. С увеличением производительности, усложнением производственных процессов, развитием электронной элементной базы и методов функционирования информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) возникает вопрос о повышении показателей надёжности.

Одним из основополагающих элементов станков с ЧПУ является координатная система, задачей которой является

перемещение режущего инструмента в пределах рабочего пространства. Современные станки с ЧПУ различаются в зависимости от количества поддерживаемых координат. В классическом случае координатные системы станков с ЧПУ передвигают режущий инструмент по трём координатам X, Y, Z, отвечающим за продольное, поперечное и вертикальное перемещения соответственно. Координатная система станков с ЧПУ представляет собой замкнутую динамическую систему и содержит следующие элементы: управляющий сервоконтроллер; электрический привод, включающий электрический двигатель и ИИУС; механические устройства, отвечающие за линейное и угловое перемещения; датчики обратной связи, следящие за положением и скоростью перемещения рабочих органов.

В станкостроении широко распространены электрические приводы переменного тока, основанные на методе векторного управления [1]. Сущность метода векторного управления заключается в реализации совокупностей последовательных действий, позволяющих контролировать частоту, амплитуду и фазу питающего напряжения электродвигателя. Система векторного управления содержит блок преобразования координат, регулятор скорости, датчик положения ротора, два или три контура тока с соответствующими регуляторами и датчиками, широтно-импульсный модулятор, силовой преобразователь и т. д. ИИУС электропривода, основанные на методе векторного управления, обладают высоким быстродействием и хорошими метрологическими характеристиками. Однако схемы ИИУС данных электроприводов имеют низкую надёжность. Это связано с тем, что подобные ИИУС электропривода содержат три параллельных контура управления током (в некоторых случаях два) в статорных обмотках двигателя.

В статье [2], посвящённой оценке метрологических характеристик электропривода на базе бесколлекторного двигателя постоянного тока (БДПТ) для лазерных установок, приведена схема электропривода, отличительной особенностью которого является использование одного подчинённого контура коррекции тока путём введения блока перемножения сигналов заданий тока и скорости. На основании результатов теоретического исследования и практических испытаний, описанных в [2], установлено, что предложенный электропривод соответствует ГОСТ 27803-91 «Электроприводы регулируемые для металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов. Технические требования», имеет необходимые метрологические характеристики [3, 4] и может быть использован в составе координатных систем лазерных установок. Экспериментально получены характеристики электропривода: полоса пропускания частот контура скорости 123 Гц; диапазон регулирования скорости около 9000; коэффициент неравномерности вращения 0,16. Данный электропривод по характеристикам почти не уступает аналогичным системам, основанным на методе векторного управления, но имеет более высокие показатели надёжности. Сокращение элементов структуры электропривода путём устранения подчинённой трёхконтурной схемы управления током существенно повышает надёжность не только электропривода, но и лазерной

установки в целом. Наиболее информативным параметром, характеризующим общую надёжность системы, является вероятность безотказной работы (ГОСТ 27.002-2015 «Надёжность в технике. Термины и определения»). Данную вероятность определяют простым в применении, наглядным и информативным методом структурных схем [5].

В простейшем случае (без каналов резервирования) электрический привод можно представить в виде последовательного соединения блоков, характеризующих надёжность того или иного элемента схемы. В случае экспоненциального закона распределения вероятностей общую вероятность $P_{ЭП}(t)$ безотказной работы электропривода в заданном интервале времени t рассчитывают по формуле

$$P_{ЭП}(t) = \prod_{i=1}^k P_k(t),$$

где k – количество блоков структурной схемы электропривода; $P_k(t)$ – вероятность безотказной работы k -го элемента.

Сравнение результатов расчётов вероятности безотказной работы при $t=5000; 10000; 12000$ ч для рассмотренных электроприводов показало, что устранение трёхконтурной системы управления током в обмотках двигателя позволяет повысить надёжность ИИУС в диапазоне 6–10 %. Разброс расчётных значений параметра надёжности зависит от технического исполнения ИИУС электропривода.

Цель настоящей работы – оценить работоспособность электропривода повышенной надёжности [2] в составе координатной системы лазерной установки методом имитационного компьютерного моделирования. При этом необходимо решить следующие задачи: рассмотреть общий принцип работы и типы координатных систем, применяемых в составе лазерных установок; синтезировать параметры регуляторов следящего электропривода; составить обобщённую схемотехническую модель координатной системы лазерной установки с ИИУС электропривода повышенной надёжности; проанализировать результаты моделирования и сделать соответствующие выводы.

Принцип работы электропривода координатной системы лазерной установки. Лазерная установка представляет собой сложную автоматизированную систему [6] и включает в себя лазер, оптические устройства для формирования лазерного пятна, кинематическую схему (координатные столы, гальваносканеры и др.), электрические приводы, систему охлаждения, источник питания, вычислительные устройства и т. д. Лазерные установки различаются типом используемого лазера (газовый или твёрдотельный), организацией оптической схемы, объёмом рабочего пространства и типом кинематической системы. Применяются кинематические схемы трёх основных типов – схемы, реализующие перемещение детали обрабатываемого изделия относительно лазерного пятна или сканирование лазерного пятна, а также схемы портального типа [7]. Для линейного перемещения во всех кинематических схемах используются следящие электроприводы линейного перемещения. Основная задача следящего электропривода в составе

координатной системы лазерной установки – обеспечение с заданной точностью линейного движения исполнительного органа (в рассматриваемом случае – лазерного пятна) в соответствии с произвольно изменяющимся входным сигналом управления. Преобразователи линейных перемещений в составе лазерных установок могут быть в виде шариковинтовых передач (ШВП), передач шестерня – рейка или линейных электрических двигателей.

В настоящей статье рассмотрена схема следящего электрического привода с кинематической схемой типа ШВП из состава лазерной установки серии МЛП производства ОАО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» (Россия).

Следящий электропривод, реализующий линейные перемещения лазерного инструмента, можно представить в виде динамической системы с тремя подчинёнными контурами регулирования положения, скорости и тока. Общая структурная схема следящего электропривода с ИИУС повышенной надёжности (рис. 1) включает в себя ИИУС электропривода

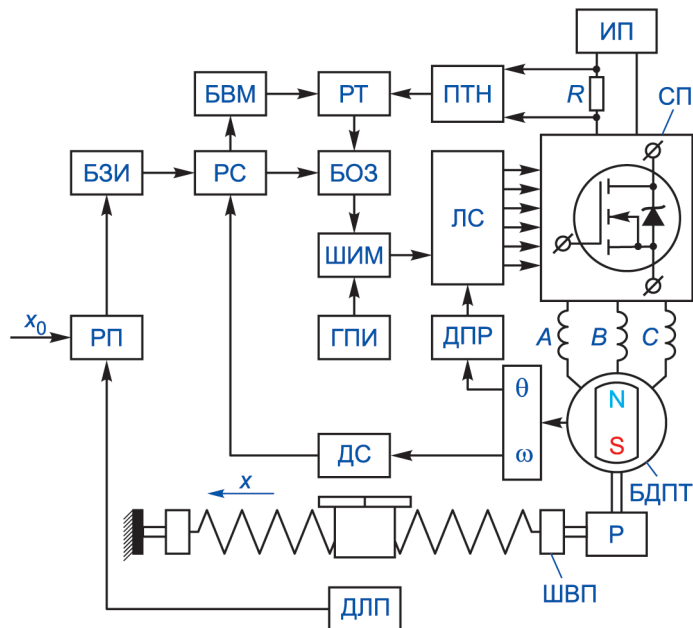


Рис. 1. Структурная схема следящего электропривода:

ИП – источник питания; *РП* – регулятор положения; *БЗИ* – блок задания интенсивности; *РС* – регулятор скорости; *БВМ* – блок выделения модуля; *РТ* – регулятор тока; *БОЗ* – блок определения знака; *ШИМ* – широтноимпульсный модулятор; *ГПИ* – генератор пилообразных импульсов; *ЛС* – логическая схема; *СП* – силовой преобразователь; *ПТН* – преобразователь «ток – напряжение»; *БДПТ* – бесколлекторный двигатель постоянного тока; *ДПР*, *ДС*, *ДЛП* – датчики соответственно положения ротора, скорости и линейного перемещения; *Р* – редуктор; *ШВП* – шарико-винтовая передача

Fig. 1. Structural diagram of the servo drive:

PS – power source; *PC* – position controller; *SB* – setting block; *SC* – speed controller; *BSS* – module selection scheme; *CC* – current controller; *SDB* – sign definition block; *PWM* – pulse-width converter; *PG* – pulse generator; *LC* – logic circuit; *PI* – power inverter; *CVC* – current/voltage converter; *BDCM* – brushless DC motor; *RPS* – rotor position sensor; *DS* – speed sensor; *R* – reducer; *LDS* – linear displacement sensor

(показаны регуляторы положения *РП*, скорости *РС* и тока *РТ*), схемы широтно-импульсной модуляции *ШИМ*, силовой преобразователь *СП* и кинематическую схему, в которую входят *БДПТ*, редуктор *Р*, *ШВП*. Для измерения тока, потребляемого электродвигателем, применяются датчики на основе эффекта Холла или шунтирующие резисторы. Скорость вращения *БДПТ* определяется встроенным оптическим энкодером. Координаты режущего инструмента измеряются бесконтактным лазерным датчиком линейного перемещения *ДЛП*, принцип работы которого основан на фотоэлектрическом или интерференционном методах считывания. Согласно ГОСТ 27803-91 следящий электропривод главного движения должен обеспечивать заданное перемещение при заданной скорости в соответствии с командой в виде параллельного или последовательного кодов, или в виде последовательности импульсов, а суммарное значение дрейфа линейного перемещения не должно превышать $\pm 2\Delta$, где Δ – минимально возможное перемещение режущего инструмента лазерной установки, определяемое разрядностью датчика линейного перемещения

$$\Delta = L_{\max} / 2^Z,$$

где $L_{\max}$ – максимальное перемещение режущего инструмента; Z – число разрядов датчика линейного перемещения.

Синтез параметров регуляторов следящего электропривода. Обычно синтез параметров регуляторов следящего электропривода проводится методом замены (замещения) БДПТ эквивалентным магнитоэлектрическим двигателем постоянного тока [8–10]. Модель магнитоэлектрического двигателя постоянного тока с учётом кинематической схемы ШВП [11, 12] описывается системой уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} U_{06M} &= RI_{06M} + L_{06M} dI_{06M}/dt + k_{ЭДС} \omega_1; \\ J_1 d\omega_1/dt &= k_{\Pi} I_{06M} - N^{-1} M_{\Pi p}; \\ \omega_1 &= d\theta/dt; \\ M_{\Pi p} &= C(\theta N^{-1} - x) + (\theta N^{-1} - x) d\beta/dt; \\ M_{\Pi p} &= \omega_2 dJ_2/dt; \\ \omega_2 &= dx/dt. \end{aligned} \right.$$

где $U_{\text{обм}}, I_{\text{обм}}$ – амплитуды напряжения и тока в обмотках статора; $R, L_{\text{обм}}$ – сопротивление и индуктивность обмотки статора; $k_{\text{ЭДС}}$ – коэффициент передачи электродвижущей силы (ЭДС); ω_1, ω_2 – угловые скорости вращения соответственно двигателя и винта; J_1, J_2 – моменты инерции соответственно на валу двигателя и ШВП; k_n – электромеханический коэффициент передачи; N – коэффициент передачи редуктора; $M_{\text{пр}}$ – приведённый момент силы на валу двигателя; C – эквивалентная осевая жёсткость ШВП; θ – угол поворота ротора двигателя; x – линейное перемещение; β – коэффициент вязкого трения.

Момент инерции ШВП с учётом шага резьбы h и массы m перемещаемого груза (лазерный резак и оптическая система) рассчитывается по выражению $J_2 = m[h/(2\pi)]^2$.

Коэффициент жёсткости ШВП определяется исходя из геометрических размеров упругого элемента (винта) и материала. Винт ШВП можно представить в виде упругого стержня, коэффициент жёсткости при растяжении и сжатии которого вычисляется как $C \approx SE/L$, где S – площадь поперечного сечения стержня; E – модуль упругости материала стержня; L – длина упругого стержня (винта) [13].

Коэффициент передачи редуктора N рассчитывается из отношения максимальной скорости $v_{л\max}$ линейного перемещения ШВП к максимальной угловой скорости двигателя $\omega_{д\max}$: $N \approx v_{л\max}/\omega_{д\max}$.

В рамках классической теории электропривода регулятор тока настраивается согласно условию технического оптимума. Исходя из параметров математической модели магнитоэлектрического двигателя постоянного тока, линейной модели силового преобразователя и коэффициента преобразования датчика тока передаточная функция регулятора тока имеет вид

$$W_{РТ}(s) = R(2T_{СП}k_{СП}k_{ДТ})^{-1} = k_{РТ},$$

где $T_{СП}$, $k_{СП}$ – постоянная времени и коэффициент передачи силового преобразователя; $k_{ДТ}$, $k_{РТ}$ – коэффициенты передачи датчика и регулятора тока соответственно.

В соответствии с настройкой регулятора скорости на симметричный оптимум передаточная функция регулятора скорости определяется как

$$W_{РС}(s) = \frac{J_1 k_{ДТ} (8T_{СП}s + 1)}{32k_m T_{СП}^2 k_{ДС}s},$$

где $k_{ДС}$ – коэффициент передачи датчика скорости.

С учётом особенностей аналогового исполнения регулятора справедливо равенство

$$W_{РС}(s) = k_{РС}(1 + T_{РС1}s)(1 + T_{РС2}s)^{-1},$$

где $k_{РС}$, $T_{РС1}$, $T_{РС2}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянные времени регулятора скорости.

Для устранения перерегулирования и получения плавного переходного процесса контур положения следящего электропривода настраивается согласно условию технического оптимума. Для упрощения расчётов подчинённые контуры управления скоростью и током аппроксимируются выражением

$$W_{с-т}(s) = [k_{ДС}(1 + 4T_{СП}s)]^{-1}.$$

Расчёт передаточной функции регулятора положения проводится без учёта влияния кинематической схемы, тогда его передаточная функция имеет вид

$$W_{РП}(s)k_{ДП}[k_{ДС}(1 + 4T_{СП}s)]^{-1} = [8T_{СП}s(1 + 4T_{СП}s)]^{-1},$$

где $k_{ДП}$ – коэффициент передачи датчика положения.

Численно коэффициент передачи датчика линейного перемещения можно рассчитать, зная рабочую длину L винта и расстояние Δx , пройденное за одну Δ : $k_{ДП} = L/\Delta x$.

Передаточная функция регулятора положения в общем виде определяется выражением

$$W_{РП}(s) = k_{ДТ}(8k_{ДП}T_{СП})^{-1}.$$

Для устранения перерегулирования системы сигнал задания положения подаётся на вход регулятора положения через схему блока задания интенсивности, передаточная функция которого имеет вид

$$W_{ЗИП}(s) = k_{ЗИП}(1 + T_{ЗИП}s)^{-1},$$

где $k_{ЗИП}$, $T_{ЗИП}$ – коэффициент передачи и постоянная времени задатчика интенсивности регулятора положения.

Проверим правильность расчётов на упрощённой компьютерной модели следящего электропривода с эквивалентным магнитоэлектрическим двигателем постоянного тока. Моделирование электропривода проведено в пакете Matlab Simulink. Модель содержит три контура обратной связи (положение, скорость и ток), блоки датчиков, блоки регуляторов с расчётными передаточными функциями, электродвигатель и кинематическую схему (ШВП) и учитывает

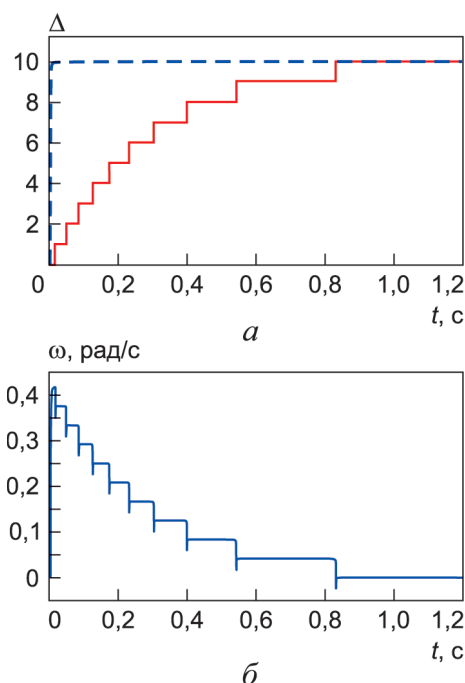


Рис. 2. Переходные процессы в упрощённой модели следящего электропривода:

графики переходного процесса положения рабочего органа (а) и тахограмма изменения скорости вращения двигателя (б)

Fig. 2. Transient processes in a simplified model of a servo drive: graphs of the transient process of the position of the working body (a) and a tachogram of changes in the engine speed (b)

перемещение режущего инструмента в пределах одной координаты и только на максимальной скорости. Коэффициентом вязкого трения β пренебрегают вследствие малости, эквивалентную осевую жёсткость C подбирают согласно классу точности ШВП или экспериментально, ограничения для силового преобразователя лежат в диапазоне $-150...+150$ В. Модель силового преобразователя представлена в виде апериодического звена с передаточной функцией

$$W_{СП}(s) = \frac{U_{пит}}{U_{упр}} \frac{1}{1 + 2f_{ШИМ}^{-1}s},$$

где $U_{пит} = \pm 150$ В – напряжение питания силового преобразователя; $U_{упр} = 10$ В – максимальное управляющее напряжение; $f_{ШИМ}$ – частота модулирующего сигнала ($T_{СП} = 2f_{ШИМ}^{-1}$).

Проверим модель, подав на её вход сигнал задания перемещения (ступеньку) рабочего органа на 10Δ . Проанализируем

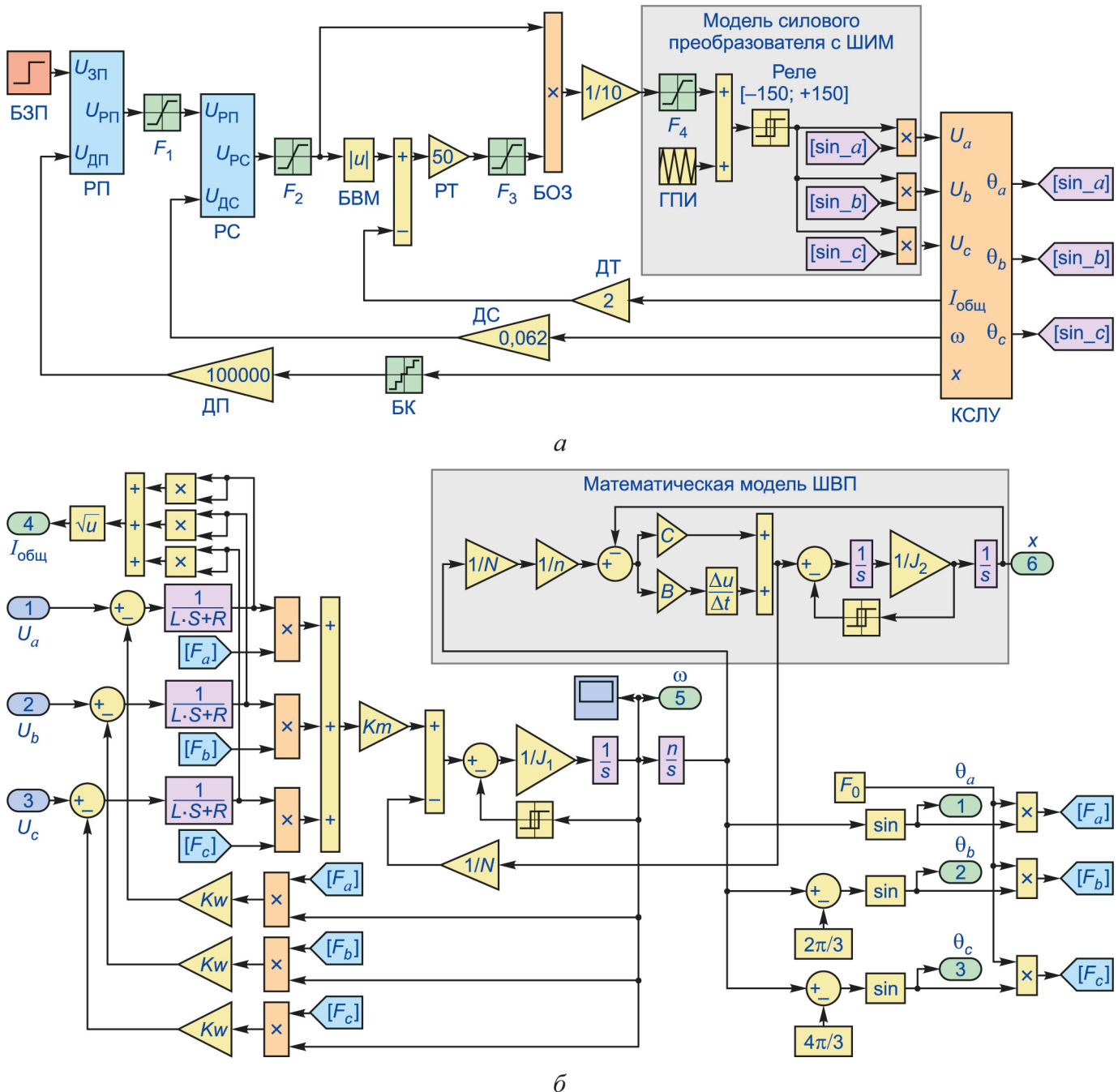


Рис. 3. Схематическая модель следящего электропривода повышенной надёжности: общая модель (а) и математическая модель блока кинематической системы (б)

Fig. 3. Schematic model of an increased reliability servo drive: general model (a) and mathematical model of the kinematic system block (b)

получившиеся графики переходного процесса положения рабочего органа (рис. 2, а) и тахограмму изменения скорости вращения двигателя (рис. 2, б). Согласно п. 2.5.7 ГОСТ 27803-91 отсутствие перерегулирования переходного процесса положения рабочего органа характеризует адекватность работы модели электропривода и правильность выполненных расчётов, а тахограмма изменения скорости вращения двигателя иллюстрирует влияние эффекта квантования (неравномерность скорости).

Анализ схемотехнической модели следящего электропривода повышенной надёжности. Проведя синтез регуляторов и оценив первичные результаты моделирования, составим полную схемотехническую модель координатной системы с электроприводом повышенной надёжности.

В случае применения ротационных трёхфазных БДПТ в качестве исполнительного механизма координатных систем лазерных установок система дифференциальных уравнений, описывающая электрическую [14] и механическую часть кинематической схемы, будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} U_a D_1 &= R I_a(\theta) + L_{обм} \frac{dI_a(\theta)}{dt} + k_{ЭДС} \Phi_0 \omega_1 D_1; \\ U_b D_2 &= R I_b(\theta) + L_{обм} \frac{dI_b(\theta)}{dt} + k_{ЭДС} \Phi_0 \omega_1 D_2; \\ U_c D_3 &= R I_c(\theta) + L_{обм} \frac{dI_c(\theta)}{dt} + k_{ЭДС} \Phi_0 \omega_1 D_3; \\ M_{\Sigma} &= [I_a(\theta) \Phi_0 D_1 + I_b(\theta) \Phi_0 D_2 + I_c(\theta) \Phi_0 D_3] k_{\Pi}; \\ J_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= M_{\Sigma} - \frac{1}{N} M_{\Pi}; \quad \omega_1 = n \frac{d\theta}{dt}; \\ M_{\Pi} &= C \left(\frac{\theta}{Nn} - x \right) + \beta \frac{d}{dt} \left(\frac{\theta}{Nn} - x \right); \\ M_{\Pi} &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \quad \omega_2 = \frac{dx}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где U_a, U_b, U_c и I_a, I_b, I_c – соответственно амплитуды напряжения и тока в обмотках статора; $D_1 = \sin(\theta n)$; $D_2 = \sin\left(\theta n - \frac{2\pi}{3}\right)$; $D_3 = \sin\left(\theta n - \frac{4\pi}{3}\right)$; n – количество пар полюсов; Φ_0 – магнитный поток; M_{Σ} – суммарный электромагнитный момент.

Для достижения плавного изменения скорости и устранения стартового перерегулирования, вызванного эффектом квантования, выходной сигнал регулятора положения должен поступать на вход регулятора скорости через схему задатчика интенсивности [15], передаточная функция которого имеет вид

$$W_{ЗИС}(s) = k_{ЗИС} / (1 + T_{ЗИС} s),$$

где $k_{ЗИС}$, $T_{ЗИС}$ – постоянная времени и коэффициент передачи задатчика интенсивности регулятора скорости.

Про моделируем общую схемотехническую модель следящего электропривода в программном пакете Matlab Simulink (рис. 3, а). Напряжение на обмотках статора БДПТ $U_{обм} = \pm 150$ В, частота генератора широтно-импульсной модуляции $f_{ШИМ} = 60$ кГц. Модель исследована методом интегрирования

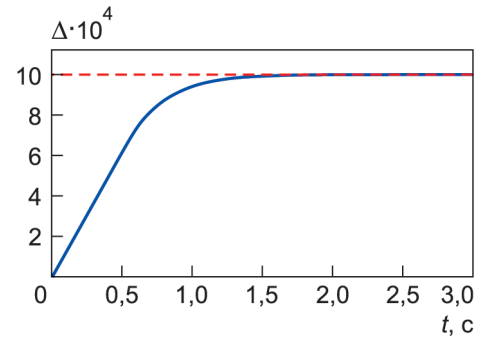


Рис. 4. Переходный процесс модели следящего электропривода повышенной надёжности при $1 \cdot 10^5 \Delta$

Fig. 4. Transient processes of the increased reliability servo drive model at $1 \cdot 10^5 \Delta$

Богачко-Шампина с шагом $5 \cdot 10^{-7}$. Параметры модели:

$L_{обм} = 0,003$ Гн; $R = 1$ Ом; $\Phi_0 = 1$ Вб; $n = 4$; $C = 650$ Н·мкм $^{-1}$; $\beta = 1 \cdot 10^{-6}$; $N = 120$; $J_1 = 0,0002$ Н·м·с 2 ·рад $^{-1}$; $J_2 = 0,0003$ Н·м·с 2 ·рад $^{-1}$; $k_M = 1$ Н·м·А $^{-1}$; $k_{ЭДС} = 1$ В·рад·с $^{-1}$; $k_{ДТ} = 2$ В·А $^{-1}$; $k_{ДС} = 0,06$ В·с·рад $^{-1}$; $k_{ДП} = 100000 \Delta$ рад $^{-1}$; $k_{СП} = 15$; $T_{СП} = 1 \cdot 10^{-5}$ с; $k_{РТ} = 50$; $k_{РС} = 50000$; $k_{РП} = 0,00025$; $k_{ЗИС} = k_{ЗИП} = 1$; $T_{ЗИС} = 0,002$ с; $T_{ЗИП} = 0,025$ с; $T_{РС1} = 0,5$ с; $T_{РС2} = 0,5$ с; $T_{ЗИ} = 0,0025$ с.

На рис. 3 б представлена математическая модель блока кинематической системы лазерной установки, состоящая из математических блоков пакета Matlab Simulink. Модель кинематической системы полностью повторяет систему дифференциальных уравнений (1). Основными составляющими модели являются модели *БДПТ*, *ШВП*, датчик положения ротора *ДПР* и модуль расчёта общего тока. Общий ток в обмотках статора БДПТ рассчитывается как

$$I_{общ}(t) = \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}.$$

Подадим на вход схемотехнической модели следящего электропривода (см. рис. 3, а) сигналы задания перемещения рабочего органа на максимально возможное (1 м или $1 \cdot 10^5 \Delta$) и минимально возможное ($0,1$ м или 10Δ) значения. Получившиеся графики переходного процесса положения рабочего органа (рис. 4) не имеют перерегулирования, что соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к следящему электроприводу. Согласно оценке времени переходного процесса при задании максимального перемещения $1 \cdot 10^5 \Delta$ режущий инструмент пройдет расстояние 1 м за $1,26$ с. Отсутствие резких бросков на выходной тахограмме (см. рис. 4) свидетельствует о правильности выбора постоянной времени задатчика интенсивности регулятора скорости и несущей частоты ШИМ. Погрешность линейного перемещения не превышает $\pm 2 \Delta$. Реальные испытания электропривода [2] доказывают, что для его нормального функционирования достаточно частоты генератора пилообразных импульсов 25 кГц. Необходимость увеличения частоты ШИМ в рамках схемотехнической модели более чем в два раза (по сравнению с реальной) связана с несовершенством модели, метода интегрирования и невысокой точности интегрирования.

Заключение. Проанализирована работа электропривода повышенной надёжности в составе координатной системы лазерной установки и составлена схемотехническая модель координатной системы, включающая электропривод и кинематическую схему для линейного перемещения лазерного инструмента в пределах одной координаты. Работоспособность модели подтверждена графиком переходного процесса (см. рис. 4): переходные процессы не имеют перерегулирования и срывов в пределах всего диапазона перемещения. Доказана необходимость внедрения в схемотехническую модель задатчика интенсивности сигнала задания скорости для устранения неравномерности вращения, вызванного эффектом квантования. Приведены выражения для предварительного синтеза параметров регуляторов положения, скорости и тока, полученные методом замены БДПТ эквивалентным магнитоэлектрическим двигателем постоянного тока. На основании полученных теоретических результатов схемотехнического моделирования подтверждены работоспособность разработанного электропривода повышенной надёжности и возможность его использования в составе координатных систем лазерных установок.

Список источников

1. Tingting Liu, Guojin Chen, Shigang Li, *Open Automation and Control Systems Journal*, 2014, vol. 6, pp. 1334–1341. <https://doi.org/10.2174/1874444301406011334>
2. Мостовской М. В. Регулируемый электропривод для лазерных технологических установок: оценка метрологических характеристик методом схемотехнического моделирования // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 8–13. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-8-13>
3. Слепцов В. В., Мостовской М. В. Определение технических требований для систем управления электрическим приводом в станках лазерного раскроя металла // Законодательная и прикладная метрология. 2019. № 6 (6). С. 27–29.
4. Слепцов В. В., Мостовской М. В. Методика оценки метрологических характеристик регулируемого электропривода методом схемотехнического моделирования // Законодательная и прикладная метрология. 2021. № 1 (6). С. 22–26.
5. Кривель С. М. Анализ структурной схемы надёжности технических систем с использованием SIMULINK // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 6. С. 85–97.
6. Кондратенко В. С., Наумов А. С., Рогов А. Ю. Внедрение технологии лазерного управляемого термораскалывания в России // Российский технологический журнал. 2017. № 1. С. 3–14. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-1-3-14>
7. Вакс Е. Д., Миленький М. Н., Сапрыкин Л. Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Техносфера, 2013. 696 с.
8. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.

9. Высоцкий В. Е., Воронин С. М., Горшков Р. Г. Имитационное моделирование электромагнитных и электромеханических процессов вентильного двигателя // Вестник ИГЭУ. 2011. № 1. С. 1–4.

10. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: Учебное пособие. СПб.: Корона Принт, 2017. 320 с.

11. Wei-Lung Mao, Suprpto, Chung-Wen Hung, *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 8 (7), pp. 1–17. <https://doi.org/10.1177/1687814016654603>

12. Гусев Н. В., Букреев В. Г. Системы цифрового управления многокоординатными следящими электроприводами: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 213 с.

13. Аксенов М. И. Моделирование электропривода: учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2021. 135 с.

14. Герман-Галкин С. Г. Многовариантный анализ вентильного электропривода с бесконтактным двигателем постоянного тока // Силовая электроника. 2017. № 4. С. 72–79.

15. Чернов Е. А., Кузьмин В. П. Комплектные электроприводы станков с ЧПУ: Справочное пособие. Горький: Волго-Вятское книжное издательство, 1989. 320 с.

References

1. Tingting Liu, Guojin Chen, Shigang Li, *Open Automation and Control Systems Journal*, 2014, vol. 6, pp. 1334–1341. <https://doi.org/10.2174/1874444301406011334>
2. Mostovskoy M. V., Regulated electric drive for laser technological installations: evaluation of metrological characteristics by the method of circuit modeling, *Izmeritel'naya tekhnika*, 2022, no. 2, pp. 8–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-8-13>
3. Sleptsov V. V., Mostovskoy M. V., Technical requirements for electric drive control systems used in laser metal cutting machines, *Legal and Applied Metrology*, 2019, no. 6 (6), pp. 27–29. (In Russ.)
4. Sleptsov V. V., Mostovskoy M. V., Methodology for assessing metrological characteristics of a controlled electric drive by a method of circuit simulation, *Legal and Applied Metrology*, 2021, no. 1 (6), pp. 22–26. (In Russ.)
5. Krivel S. M., SIMULINK-based analysis of the structural reliability scheme of technical systems, *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2018, vol. 22, no. 06 (137), pp. 85–97. (In Russ.)
6. Kondratenko V. S., Naumov A. S., Rogov A. Yu., Introduction of laser technology controlled thermo-cracking in Russia, *Russian Technological Journal*, 2017, no. 5 (1), pp. 3–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-1-3-14>
7. Vaks E. D., Milenkii M. N., Saprykin L. G., *Practice of precision laser proceeding*, Moscow, Tekhnosfera Publ., 2013, 696 p. (In Russ.)
8. German-Galkin S. G., *Matlab & Simulink. Design of mechatronic systems on PC*, St. Petersburg, KORONA-Vek Publ., 2008, 368 p. (In Russ.)
9. Vysotsky V. E., Voronin S. M., Gorshkov R. G., Simulation modeling of electromagnetic and electromechanical processes of a valve motor, *Vestnik IGEU*, 2011, no. 1, pp. 1–4. (In Russ.)

10. German-Galkin S. G., *Computer simulation of semiconductor systems in Matlab 6.0: textbook*, St. Petersburg, Korona Print publ., 2017, 320 p. (In Russ.)
11. Wei-Lung Mao, Suprpto, Chung-Wen Hung, *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 8 (7), pp. 1–17.
<https://doi.org/10.1177/1687814016654603>
12. Gusev N. V., Bukreev V. G., *Sistemy cifrovogo upravleniya mnogokoordinatnymi sledyashchimi elektroprivodami: uchebnoe posobie [Digital control systems for multi-coordinate servo electric drives: study guide]*, Tomsk, Publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2010, 213 p. (In Russ.)
13. Aksenov M. I., *Modelirovanie elektroprivoda: uchebnoe posobie [Modeling of the electric drive: textbook]*, Moscow, INFRA-M Publ., 2021, 135 p. (In Russ.)
14. German-Galkin S. G., *Mnogovariantnyj analiz ventil'nogo elektroprivoda s beskontaktnym dvigatelem postoyannogo toka [Multivariate analysis of a valve drive with a non-contact DC motor]*, *Silovaya elektronika*, 2017, no. 4, pp.72–79. (In Russ.)
15. Chernov E. A., Kuzmin V. P., *Komplektnye elektroprivody stankov s CHPU: Spravochnoe posobie [Complete electric drives of CNC machines: a reference guide]*, Gorky, Volgo-Vyatskoe knizhnoe izdatel'stvo Publ., 1989, 320 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 14.03.2022; одобрена после рецензирования 31.03.2022; принята к публикации 02.04.2022.
The article was submitted 14.03.2022; approved after reviewing 31.03.2022; accepted for publication 02.04.2022.

Научная статья

УДК 531.77

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-50-55>

Рамочный микрооптоэлектромеханический преобразователь угловой скорости с узлами оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта

Владимир Игоревич Бусурин¹, Александр Викторович Казарьян², Сергей Георгиевич Штек³,
Максим Александрович Жеглов⁴, Станислав Олегович Васецкий⁵✉, Чжи Пхай Линн⁶

^{1, 2, 5, 6} Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

^{3, 4} Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, Москва, Россия

¹vbusurin@mai.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9452-5785>

²kazaryan1@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8922-7858>

³corund@gosniip.ru

⁴mazheglov@mail.ru

⁵vasetskiyso@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3316-5349>

⁶02thaelay1500@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3613-8565>

Аннотация. Предложена модель рамочного микрооптоэлектромеханического преобразователя угловой скорости с электростатическим возбуждением первичных колебаний. В состав преобразователя входят узлы оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта, в которых реализовано прецизионное оптическое считывание субмикрометровых перемещений чувствительного элемента. Экспериментально исследован узел оптического считывания и определена линейная область функции преобразования рабочего зазора в оптическую мощность. Для измерения амплитуды вторичных колебаний чувствительного элемента (несколько сотен нанометров) использовано два канала считывания оптических сигналов. Найдены значения параметров упругих подвесов для обеспечения вторичного движения чувствительного элемента в диапазоне высокой чувствительности узлов оптического считывания. Оценены параметры предложенного преобразователя и нелинейность функции преобразования в диапазоне измеряемых угловых скоростей. Предложенный микрооптоэлектромеханический преобразователь может быть эффективно использован для высокочувствительного измерения угловых скоростей подвижных объектов.

Ключевые слова: микрооптоэлектромеханический преобразователь, угловая скорость, рамочный чувствительный элемент, оптическое считывание, оптический туннельный эффект, отражательная способность

Для цитирования: Бусурин В. И., Казарьян А. В., Штек С. Г., Жеглов М. А., Васецкий С. О., Чжи П. Л. Рамочный микрооптоэлектромеханический преобразователь угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 50–55.
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-50-55>

Frame micro-optoelectromechanical angular velocity transducer with optical readout units based on the optical tunneling effect

Vladimir I. Busurin¹, Alexander V. Kazaryan², Sergey G. Shtek³, Maksim A. Zheglov⁴,
Stanislav O. Vasetskiy⁵✉, Phay L. Kyi⁶

^{1, 2, 5, 6} Moscow Aviation institute, Moscow, Russia

^{3, 4} State Research Institute of Instrumentation, Moscow, Russia

¹vbusurin@mai.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9452-5785>

²kazaryan1@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8922-7858>

³corund@gosniip.ru

⁴mazheglov@mail.ru

⁵vasetskiyso@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3316-5349>

⁶02thaelay1500@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3613-8565>

Abstract. A model of a frame micro-optoelectromechanical angular velocity transducer with electrostatic excitation of primary oscillations is proposed. The transducer includes optical readout units based on the optical tunnel effect, in which precision optical reading of submicrometer movements of the sensing element is implemented. The optical reading unit was experimentally investigated

and the linear region of the function of converting the working gap into optical power was determined. To measure the amplitude of the secondary vibrations of the sensitive element (several hundreds of nanometers), two channels for reading optical signals were used. Values of the parameters of elastic suspensions are found to ensure the secondary movement of the sensitive element in the range of high sensitivity of the optical readout units. The parameters of the proposed transducer and the nonlinearity of the transformation function in the range of measured angular velocities are estimated. The proposed micro-optoelectromechanical transducer can be effectively used for highly sensitive measurement of the angular velocities of moving objects.

Keywords: micro-opto-electromechanical transducer, angular velocity, frame sensing element, optical readout, optical tunneling effect, reflectivity

Введение. Быстрое развитие микроэлектроники способствовало широкому распространению микроэлектромеханических систем (МЭМС). Их эффективно используют для построения малогабаритных инерциальных датчиков навигационных систем – гироскопов и акселерометров [1–3], причём постоянное уменьшение габаритных размеров МЭМС расширяет сферу применения этих систем.

В классических датчиках на базе МЭМС уменьшение размеров чувствительного элемента, как правило, сужает динамический диапазон прибора. Чувствительный элемент прибора перемещается на расстояния от единиц до десятков микрон, измерение инерциальными навигационными системами малых угловых скоростей объектов ограничивается шумовыми характеристиками ёмкостных МЭМС-датчиков, а функция преобразования датчиков существенно нелинейна [4]. Кроме того, при уменьшении зазора между обкладками конденсатора при максимальных перемещениях чувствительного элемента могут создаться условия для электрического пробоя, нарушающего работу преобразователя. Для устранения этого эффекта и обеспечения измерения малых угловых скоростей инерциальными навигационными системами до долей градуса в час используются мини-резонаторы на модах шепчущей галереи [5–7] или узлы оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ) [8]. Метод измерения с использованием ОТЭ не требует применения перестраиваемых источников оптического излучения, позволяет детектировать положение чувствительного элемента с высоким разрешением в нанометровом диапазоне, обеспечивает электрическую развязку контура съёма информации от цепи возбуждения колебаний чувствительного элемента и измерение малых угловых скоростей при относительно небольшой амплитуде первичных колебаний чувствительного элемента.

Цель настоящей работы – исследование возможности построения высокочувствительного рамочного микрооптоэлектромеханического (МОЭМ) преобразователя угловой скорости с электрической развязкой контуров съёма информации и возбуждения первичных колебаний. Субмикрометровые перемещения чувствительного элемента

детектируются с помощью узлов оптического считывания на основе ОТЭ.

Функциональная схема рамочного МОЭМ-преобразователя угловой скорости. Функциональная схема рамочного МОЭМ-преобразователя угловой скорости приведена на рис. 1. Основным элементом схемы – рамочный чувствительный элемент (РЧЭ), перемещения которого связаны с внешней угловой скоростью и регистрируются узлами оптического считывания на основе ОТЭ. Узлы оптического считывания содержат призмы полного внутреннего отражения ППВО1, ППВО2 и разделённые воздушной средой части РЧЭ с нанесённым тонким слоем оптического материала. В качестве источника излучения ИИ используется лазерный диод инфракрасного

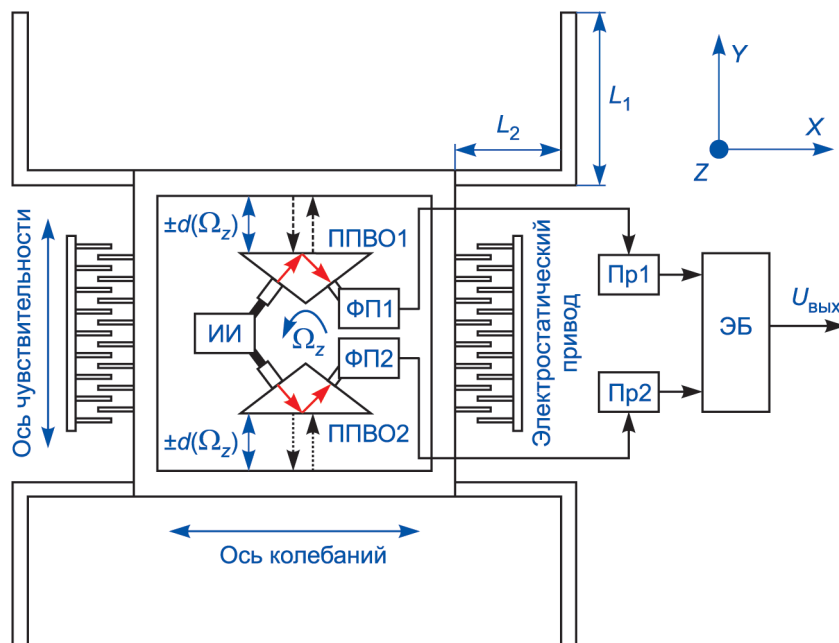


Рис. 1. Функциональная схема рамочного МОЭМ-преобразователя угловой скорости: ИИ – источник излучения; ППВО1, ППВО2 – призмы полного внутреннего отражения; ФП1, ФП2 – фотоприёмники; Пр1, Пр2 – преобразователи «ток – напряжение»; ЭБ – электронный блок обработки сигналов; L_1 , L_2 – соответственно продольная и поперечная длины упругого подвеса; $d(\Omega_z)$ – ширина зазора; направления оси чувствительности и оси первичных колебаний показаны стрелками

Fig. 1. Functional diagram of the frame MOEM angular velocity transducer: RS – radiation source; PTIR 1, PTIR 2 – prisms of total internal reflection; PD1, PD2 – photodetectors; CVC1, CVC2 – current-voltage converters; ESPU – electronic signal processing unit; L_1 – longitudinal length of elastic suspension; L_2 – the transverse length of the elastic suspension; $d(\Omega_z)$ – the width of the gap; the directions of the axis of sensitivity and the axis of primary oscillations are shown by arrows

диапазона. Оптическое излучение источника разветвляется, вводится в два планарных световода, проходит через призмы ППВО1, ППВО2 и поступает в фотоприёмники ФП1, ФП2. Фототок фотоприёмников преобразуется в напряжение преобразователями «ток – напряжение» Пр1, Пр2 и поступает в электронный блок ЭБ обработки сигналов, который формирует выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, соответствующее внешней угловой скорости.

Первичные колебания РЧЭ возбуждаются вдоль оси ОХ (см. рис. 1) с помощью сил электростатического взаимодействия на частоте резонанса РЧЭ. Для возбуждения первичных колебаний служит гребёчатый электростатический привод, состоящий из подвижных (ротор) и неподвижных (статор) электродов с зазором, постоянным по ширине и заполненным диэлектрическим слоем.

Упругие подвесы МОЭМ-преобразователя угловой скорости являются базовыми элементами его конструкции. Изменяя их параметры и расположение, можно получить необходимые характеристики преобразователя.

Исследование характеристик узла оптического считывания на основе ОТЭ. Параметры рамочного МОЭМ-преобразователя зависят от характеристик узла оптического считывания на основе ОТЭ. Для уточнения теоретических расчётов и оценки возможности использования этого метода для построения МОЭМ-преобразователя экспериментально исследовали зависимость туннелируемой оптической мощности P от ширины d зазора в узле оптического считывания.

В узле оптического считывания создаётся эванесцентное поле, которое существует в оптически менее плотной среде, чем волноводная среда распространения оптического излучения, и затухает согласно экспоненциальному закону, причём глубина проникновения такого поля в этой среде примерно равна длине волны λ источника излучения. Туннелируемая оптическая мощность зависит от отражательной

способности R границ раздела сред, поляризации излучения, ширины зазора d , а также угла θ падения электромагнитной волны на границу раздела двух сред, обеспечивающего условие полного внутреннего отражения [9]. По формулам Френеля [10] можно приближённо оценить отражательную способность $R(d)$ как функцию ширины зазора между РЧЭ и призмой полного внутреннего отражения.

Для оценки возможности использования в МОЭМ-преобразователе узла оптического считывания на основе ОТЭ разработана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 2. Экспериментальная установка обеспечивает возбуждение эванесцентного поля вблизи отражающих границ раздела сред, в которое вводится воспринимающий элемент ВЭ. При зазоре определённой ширины оптическое излучение туннелирует в воспринимающий элемент. Относительные показатели преломления плоскопараллельной пластины ПП и воспринимающего элемента выбраны одинаковыми. По значению мощности излучения, туннелирующего в воспринимающий элемент, можно судить о перемещениях, имитирующих субмикрометровые изменения положения чувствительного элемента МОЭМ-преобразователя угловых скоростей.

Источник оптического излучения ИИ – лазер с длиной волны λ . Излучение поступает в плоскопараллельную пластину ПП под требуемым углом, угол задаётся с помощью поворотного устройства ПУ. В плоскопараллельной пластине обеспечивается выполнение условий полного внутреннего отражения оптического излучения, и в местах отражения формируется эванесцентное поле. Положение воспринимающего элемента ВЭ (оптоволокну) регулируется системой позиционирования, состоящей из транслятора с микрометрическим винтом и пьезоактюатора ПА. Компьютер ПК задаёт напряжение управления пьезоактюатором с шагом 0,01 В. Туннелированная оптическая мощность регистрируется фотодиодом ФД на основе арсенида галлия – индия, подключённым к измерительной консоли ИК. По зависимости туннелируемой оптической мощности излучения от ширины воздушного зазора определяется перемещение воспринимающего элемента.

Измерения производили в нормальных климатических условиях в помещении класса чистоты ИСО 5. Туннелируемую оптическую мощность измеряли с шагом смещения воспринимающего элемента 60 нм в течение 1 мин с частотой 300 измерений в секунду. Для каждой точки было выполнено 20 измерений.

При $d/\lambda > 1$ воспринимающий элемент находится вне эванесцентного поля и среднее относительное значение выходной оптической мощности $P_{\text{ср}} = 0,22$ принимается за шумовые составляющие сигнала (рис. 3). При внесении воспринимающего элемента в зону затухания эванесцентного поля начинается туннелирование оптического излучения, сопровождающееся увеличением выходной оптической мощности $P_{\text{ср}}$. При сближении воспринимающего элемента и плоскопараллельной пластины ($d/\lambda < 1$) туннелируемая оптическая мощность монотонно возрастает, что свидетельствует об отсутствии интерференции. При механическом

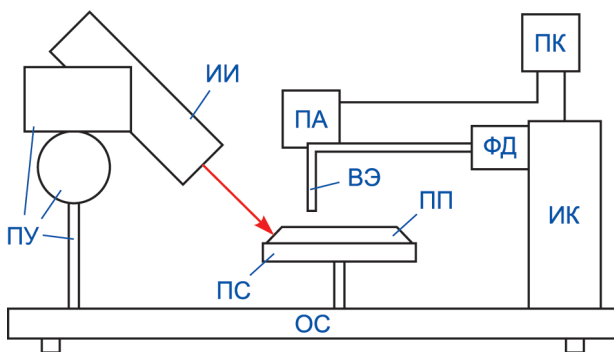


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

ПУ – поворотное устройство; ПА – пьезоактюатор; ПК – компьютер; ИК – измерительная консоль; ФД – фотодиод; ВЭ – воспринимающий элемент; ПП – плоскопараллельная пластина; ПС – предметный столик; ОС – оптический стол на демпфирующих опорах; остальные обозначения те же, что на рис. 1

Fig. 2. Scheme of the experimental setup:

RD – rotary device; PA – piezoactuator; PC – computer; MC – measuring console; PhD – photodiode; SE – sensing element; PPP – plane-parallel plate; T – table; OT – optical table on damping supports

контакте оптоволоконна и плоскопараллельной пластины ($d/\lambda=1$) регистрируемая выходная оптическая мощность максимальна: $P_{\text{ср}}=1$. Погрешность повторяемости результатов измерений оптической мощности составила 6 %.

Экспериментальные и расчётные зависимости нормированного значения $P_{\text{ср}}$ от относительного зазора d/λ приведены на рис. 3. Экспериментальная зависимость аппроксимирована в диапазоне $d/\lambda=0,30\dots0,75$ и описывается линейной зависимостью

$$P_{\text{ср}}^3(d/\lambda) = -0,941d/\lambda + 1,124.$$

При вычитании постоянной шумовой составляющей экспериментальные данные согласуются с расчётными значениями и могут быть описаны в диапазоне $d/\lambda=0,17\dots0,5$ выражением

$$P_{\text{ср}}^D(d/\lambda) = -1,72d/\lambda + 1,12.$$

Различия между расчётными и экспериментальными результатами связаны с нелинейностью характеристики пьезоактюатора, шумовой составляющей и неплоскопараллельностью зазора между пластиной и торцом оптоволоконна. Полученные экспериментальные зависимости далее используем для оценки характеристик рамочного МОЭМ-преобразователя.

Оценка характеристик рамочного МОЭМ-преобразователя угловой скорости. В МОЭМ-преобразователе с РЧЭ выходной сигнал зависит не только от угловой скорости, но и от режима первичных колебаний. Амплитуда первичных колебаний Δx рамочного преобразователя определяется с учётом [11] как

$$\Delta x = [F_3 L_1^3 (L_2 + L_1)] [4 E t h^3 (L_2 + 4 L_1)]^{-1},$$

где F_3 – электростатическая сила; L_1, L_2 – длины упругих подвесов; E – модуль Юнга; t, h – ширина и высота упругих подвесов соответственно.

Положение РЧЭ определяют с помощью узла оптического считывания на основе ОТЭ. Из-за нелинейности отражательной способности $R(d)$ чувствительность метода оптического туннелирования не постоянна в полном диапазоне измерений, зависит от начального зазора d_0 , конструктивных параметров РЧЭ, шероховатости рабочих плоскостей в зоне оптического туннелирования, а также от длины волны λ и угла падения θ оптического излучения.

При воздействии на РЧЭ внешней угловой скорости вдоль оси OZ вдоль оси OY возникает сила Кориолиса, которая создаёт вторичные колебания. Амплитуда вторичных колебаний Δy РЧЭ пропорциональна действующей угловой скорости Ω_z , а также зависит от амплитуды первичных колебаний, массы m и частоты ω собственных колебаний РЧЭ:

$$\Delta y(\Omega_z) = [2 m \Omega_z \Delta x \omega L_2^3 (L_1 + L_2)] [4 E t h^3 (L_1 + 4 L_2)]^{-1}.$$

Уменьшение габаритных размеров преобразователя влияет на амплитуду вторичных колебаний. С учётом результатов моделирования амплитуды вторичных колебаний (рис. 4)

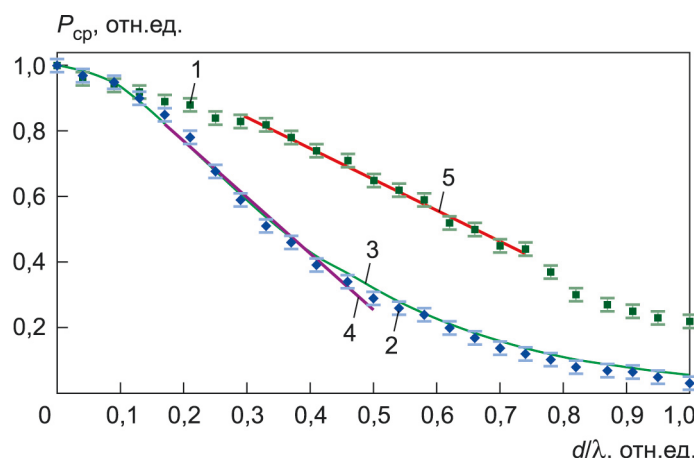


Рис. 3. Зависимость средней туннелируемой оптической мощности $P_{\text{ср}}$ от ширины воздушного зазора d/λ : 1, 2 – соответственно зашумлённые и незашумлённые экспериментальные данные; 3 – расчётные данные; 4, 5 – аппроксимации

Fig. 3. Dependence of the average tunneled optical power on the width of the air gap: 1, 2 – noisy and noiseless experimental data; 3 – calculated data; 4, 5 – approximations

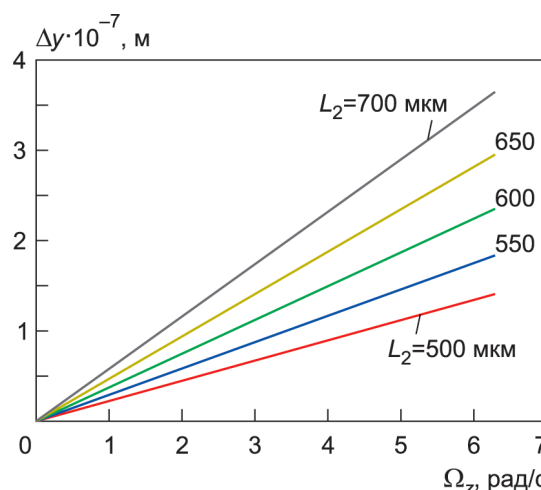


Рис. 4. Зависимость амплитуды вторичных колебаний Δy от угловой скорости Ω_z при различной длине L_2 упругого подвеса

Fig. 4. Dependence of the amplitude of secondary oscillations on the angular velocity with different lengths of elastic suspension

выбраны следующие длины упругих подвесов и возбуждающее напряжение: $L_1=1000$ мкм; $L_2=700$ мкм; $U=100$ В.

Одним из главных параметров узла оптического считывания является диапазон детектирования перемещений РЧЭ. Для реализации оптической схемы съёма и обеспечения высокой чувствительности начальное значение зазора d_0 между РЧЭ и узлом оптического считывания необходимо выбирать исходя из амплитуды вторичных колебаний, вызываемых максимально допустимой угловой скоростью $\Delta y(\Omega_{z \text{ max}})$:

$$\begin{cases} d_0 \approx 6\lambda/10; \\ \Delta y(\Omega_{z \text{ max}}) \approx \lambda/4. \end{cases}$$

При работе одного узла оптического считывания нелинейность функции преобразования составляет 0,12 % в диапазоне

измерений угловой скорости $\Omega_z = -2\pi \dots + 2\pi$. Для повышения линейности этой функции использована дифференциальная схема съёма информации, включающая два узла оптического считывания [12].

Зазоры d_1, d_2 между РЧЭ и узлами оптического считывания изменяются с частотой возбуждения первичных колебаний, зависят от действующей угловой скорости и влияют на оптическое туннелирование:

$$d_1(\Omega_z, t) = d_0 - \Delta y(\Omega_z, t);$$

$$d_2(\Omega_z, t) = d_0 + \Delta y(\Omega_z, t).$$

Диапазон измеряемых угловых скоростей линейно связан с диапазоном допустимых значений зазоров между призмами и РЧЭ. Оптические мощности $P_{\Phi\Pi 1}, P_{\Phi\Pi 2}$ излучения, падающего на фотоприёмники, определяются с помощью приближённой модели. В рамках этой модели зазор рассчитывается по центральному лучу источника излучения как точки контакта на модулирующей грани призмы полного внутреннего отражения и изменяется пропорционально отражательным способностям $R_1[d_1(\Omega_z, t)], R_2[d_2(\Omega_z, t)]$. Оптические мощности излучения $P_{\Phi\Pi 1}, P_{\Phi\Pi 2}$ на квазилинейном участке функции преобразования с учётом возможных потерь выражаются как

$$P_{\Phi\Pi 1}[d_1(\Omega_z, t)] = (P_{\text{ИИ}}/2)(1,72d_1/\lambda - 1,12)K;$$

$$P_{\Phi\Pi 2}[d_2(\Omega_z, t)] = (P_{\text{ИИ}}/2)(1,72d_2/\lambda - 1,12)K,$$

где $P_{\text{ИИ}}$ – оптическая мощность источника излучения; K – суммарный коэффициент потерь.

Фотопреобразователи преобразуют оптические мощности излучения $P_{\Phi\Pi 1}, P_{\Phi\Pi 2}$ в фототоки $I_{\Phi\Pi 1}, I_{\Phi\Pi 2}$, которые

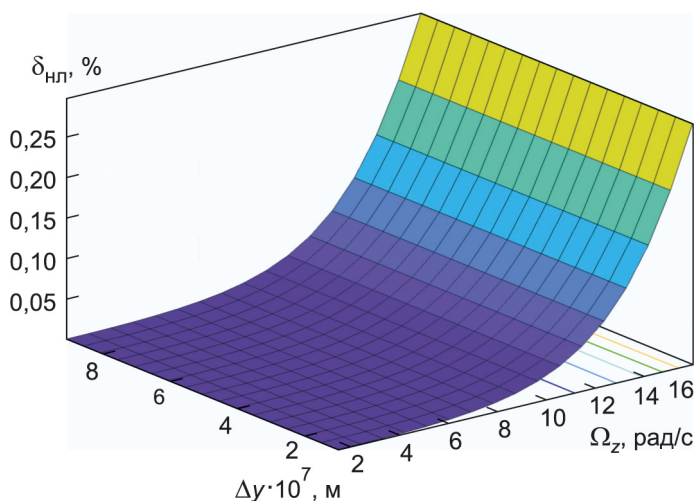


Рис. 5. Зависимость нелинейности $\delta_{\text{нл}}$ функции преобразования от амплитуды вторичных колебаний Δy и угловой скорости Ω_z

Fig. 5. Dependence of the nonlinearity of the transformation function on of the amplitude of secondary oscillations and the angular velocity

поступают на преобразователи «ток – напряжение». Выходные напряжения преобразователей $U_{\text{Пр}1}$ и $U_{\text{Пр}2}$ зависят от ширины переменного зазора и при использовании операционного усилителя записываются в виде

$$U_{\text{Пр}1}\{P_{\Phi\Pi 1}[d_1(\Omega_z, t)]\} = (I_{\tau 1} + S_1 P_{\Phi\Pi 1}[d_1(\Omega_z, t)])R_{\text{ОС}1};$$

$$U_{\text{Пр}2}\{P_{\Phi\Pi 2}[d_2(\Omega_z, t)]\} = (I_{\tau 2} + S_2 P_{\Phi\Pi 2}[d_2(\Omega_z, t)])R_{\text{ОС}2},$$

где $I_{\tau 1, 2}$ – темновые токи фотоприёмников; $S_{1, 2}$ – спектральные чувствительности фотоприёмников; $R_{\text{ОС}1, 2}$ – сопротивления обратной связи.

Напряжения двух преобразователей «ток – напряжение», которые формируют выходной сигнал узлов оптического считывания, поступают в электронный блок. В этом блоке определяются амплитуды напряжений двух преобразователей «ток – напряжение» $U_{\text{Пр}1m}, U_{\text{Пр}2m}$ и формируется выходное напряжение $U_{\text{Вых}}$ рамочного МОЭМ-преобразователя в виде

$$U_{\text{Вых}} = (U_{\text{Пр}1m} + U_{\text{Пр}2m})K_{\text{ЭБ}},$$

где $K_{\text{ЭБ}}$ – коэффициент передачи электронного блока.

Зависимость выходного сигнала рамочного МОЭМ-преобразователя от внешней угловой скорости $U_{\text{диф}}(\Omega_z) = 0,0261\Omega_z$ при дифференциальной обработке оптических сигналов в диапазоне ± 6 рад/с имеет малую нелинейность $\delta_{\text{нл}} = 0,02\%$ при следующих выбранных параметрах: $P_{\text{ИИ}} = 2$ мВт; $K_{\text{ЭБ}} = 0,5$; $d_0 = 850$ нм; $\lambda = 1550$ нм; угол падения оптического излучения $\theta = 45^\circ$; показатель преломления призмы и тонкого оптического слоя на РЧЭ $n = 1,48$.

При использовании малогабаритных фотодиодов минимально детектируемая угловая скорость рамочного МОЭМ-преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ составляет 4,4 мкрад/с. При увеличении диапазона измерения угловой скорости до 16 рад/с нелинейность функции преобразования возрастает до 0,3 % (рис. 5), что обусловлено увеличением амплитуды вторичных колебаний $\Delta y(\Omega_{z \text{ max}})$ более чем на $\lambda/4$. Для сохранения малой нелинейности при расширении диапазона угловых скоростей необходимо уменьшать амплитуду первичных колебаний РЧЭ.

Заключение. Проведённое исследование подтвердило возможность использования ОТЭ для построения рамочного преобразователя угловой скорости с электрической развязкой контуров съёма информации и возбуждения первичных колебаний. Предложенная модель рамочного МОЭМ-преобразователя угловой скорости содержит два узла оптического считывания на основе ОТЭ. Использование дифференциальной двухканальной схемы оптического считывания при выбранных параметрах позволило уменьшить нелинейность функции преобразования от 0,12 до 0,02 %.

Список источников

1. Косцов Э. Г. Состояние и перспективы микро- и нано-электромеханики // Автометрия. 2009. 45, № 3. С. 3–52.

References

2. Song W. J., Lee J. G., Kang T., Sung W. T., Lim H. T., Kim Y. K., Design of a gimbal-structured micro gyroscope and signal processing part, *Proceedings of ICCAS*, 2001, pp. 1266–1269.
3. Yazdi N., Ayazi F., Najafi K., *Proceedings IEEE*, 1998, vol. 86, no. 8, pp. 1640–1659. <https://doi.org/10.1109/5.704269>
4. Chi C. Y., Chen T. L., Compensation of imperfections for vibratory gyroscope systems using state observers, *Sensors & Transducers*, 2009, vol. 6, pp. 128–145.
5. Вьюжанина Е. А., Криштоп В. В. Дисковые резонаторы для датчиков угловой скорости // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 9. С. 823–829. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-9-823-829>
6. Xia D., Huang L., Zhao L., *Sensors*, 2019, no. 19, 2798. <https://doi.org/10.3390/s19122798>
7. Shen X., Zhao L., Xia D., *Micromachines*, 2019, vol. 10, no. 4, 264. <https://doi.org/10.3390/mi10040264>
8. Мурашкина Т. И., Бростилов С. А., Бростилова Т. Ю. Волоконно-оптический датчик давления на основе туннельного эффекта // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2010. № 4(16). С. 108–120.
9. Шварцбург А. Б. Туннелирование электромагнитных волн – парадоксы и перспективы // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. № 1. С. 43–58. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200701b.0043>
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. 2-е изд., испр.: Пер. с англ. С. Н. Бреуса и др. / Под ред. Г. П. Мотулевич. М.: Наука, 1973. 719 с.
11. Legtenberg R., Groeneveld A. W., Elwenspoek M., *Journal of Micromechanics and microengineering*, 1996, vol. 6, no. 3, 320. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/6/3/004>
12. Бусурин В. И., Жеглов М. А., Коробков В. В., Фам А. Т. Методы расширения диапазона измерения микрооптоэлектромеханического преобразователя угловых скоростей // Измерительная техника. 2017. № 6. С. 28–32.

1. Kostsov E. G., *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2009, vol. 45, no 3, pp. 189–226. <https://doi.org/10.3103/S8756699009030017>
2. Song W. J., Lee J. G., Kang T., Sung W. T., Lim H. T., Kim Y. K., Design of a gimbal-structured micro gyroscope and signal processing part, *Proceedings of ICCAS*, 2001, pp. 1266–1269.
3. Yazdi N., Ayazi F., Najafi K., *Proceedings IEEE*, 1998, vol. 86, no. 8, pp. 1640–1659. <https://doi.org/10.1109/5.704269>
4. Chi C. Y., Chen T. L., Compensation of imperfections for vibratory gyroscope systems using state observers, *Sensors & Transducers*, 2009, vol. 6, pp. 128–145.
5. Vyuzhanina E. A., Krishtop V. V., *Journal of Instrument Engineering*, 2022, vol. 65. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-9-823-829>
6. Xia D., Huang L., Zhao L., *Sensors*, 2019, no. 19, 2798. <https://doi.org/10.3390/s19122798>
7. Shen X., Zhao L., Xia D., *Micromachines*, 2019, vol. 10, no. 4, 264. <https://doi.org/10.3390/mi10040264>
8. Murashkina T. I., Brostilov S. A., Brostilova T. Ju., Волоконно-оптический датчик давления на основе туннельного эффекта, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki*, 2010, no. 4(16), pp. 108–120. (In Russ.)
9. Shvarcburg A. B., *Phys.-Usp.*, 2007, vol. 50, no. 1, pp. 37–53. <https://doi.org/10.1070/PU2007v050n01ABEH006148>
10. Born M., Wolf E., *Principles of Optics. Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, 7th edition, Cambridge University Press, 1999. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139644181>
11. Legtenberg R., Groeneveld A. W., Elwenspoek M., *Journal of Micromechanics and microengineering*, 1996, vol. 6, no. 3, 320. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/6/3/004>
12. Busurin V. I., Korobkov V. V., Fam A. T., Zheglov M. A., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no 6, pp. 558–564. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1234-z>

Статья поступила в редакцию 29.11.2021; одобрена после рецензирования 18.03.2022; принята к публикации 28.03.2022.
The article was submitted 29.11.2021; approved after reviewing 18.03.2022; accepted for publication 28.03.2022.

Метод воспроизведения нормированных сигналов с цифровой модуляцией

Иван Владимирович Могилев^{1✉}, Николай Рудольфович Баженов²

^{1, 2} Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

¹mogilev@vniiftri.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-7371-6937>

²bazhenov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8283-4129>

Аннотация. Исследована возможность создания калибратора параметров сигналов с цифровой модуляцией, основанного на генераторе сигналов произвольной формы. Разработан метод воспроизведения калибровочных сигналов с заданным значением модуля вектора ошибки (error vector magnitude, EVM) путём добавления нормированной помехи. Рассмотрен частный случай метода, где в качестве нормированной помехи используется амплитудная и фазовая модуляции. Экспериментально подтверждена возможность передачи единиц коэффициента амплитудной модуляции и девиации фазы соответственно от Государственного первичного эталона единицы девиации частоты ГЭТ 166-2020 и Государственного первичного эталона единицы коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний ГЭТ 180-2010 калибратору параметров сигналов с цифровой модуляцией.

Ключевые слова: цифровая модуляция, коэффициент битовой ошибки, модуль вектора ошибки, прослеживаемость, эталон, калибратор, квадратурная амплитудная модуляция, мобильная связь пятого поколения (5G), коэффициент амплитудной модуляции, девиация фазы

Для цитирования: Могилев И. В., Баженов Н. Р. Метод воспроизведения нормированных сигналов с цифровой модуляцией // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 56–61. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-56-61>

Method for digitally modulated signals synthesis with normalized parameters

Ivan V. Mogilev^{1✉}, Nikolay R. Bazhenov²

^{1, 2} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering Measurements, Mendeleevo, Moscow region, Russia

¹mogilev@vniiftri.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-7371-6937>

²bazhenov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8283-4129>

Abstract. The paper investigates the possibility of creating a calibrator of the parameters of signals with digital modulation based on an arbitrary waveform generator. A method is proposed for reproducing calibration signals with a given value of the error vector magnitude by adding a normalized distortion. A particular case of the method is considered, where amplitude and phase modulation is used as the normalized distortion. Experimental confirmation of the possibility of transferring the size of units of the modulation depth and phase deviation from the primary standards GET 166-2020 and GET 180-2010 to the calibrator of the parameters of signals with digital modulation has been obtained.

Keywords: digital modulation, bit error rate (BER), error vector magnitude (EVM), traceability, standard, calibrator, quadrature amplitude modulation (QAM), the 5th generation mobile network (5G), amplitude depth, phase deviation

Введение. В последние два десятилетия стремительно развиваются системы связи, увеличивается скорость передачи информации. К основным способам увеличения скорости передачи информации относятся расширение спектра радиосигналов в связи с освоением новых диапазонов частот и повышение спектральной эффективности радиосигналов в результате внедрения более сложных многопозиционных видов модуляции. Радиосигналы со сложными многопозиционными видами модуляции 64-QAM, 256-QAM (QAM – quadrature amplitude modulation, квадратурная амплитудная модуляция), несмотря на высокую спектральную

эффективность менее помехоустойчивы, чем сигналы с более простыми видами модуляции BPSK, QPSK, что ужесточает требования к качеству сложномодулированных сигналов. В миллиметровом частотном диапазоне увеличивается чувствительность широкополосных сигналов к вносимым искажениям и нарушениям структуры, что повышает требования к аппаратуре, применяемой в системах связи.

Итоговым критерием качества работы цифровых систем связи часто служит коэффициент битовой ошибки (bit error rate, BER). BER характеризует частоту появления ошибочно восстановленных битов демодулированного радиосигнала.

Однако по измеренному значению BER невозможно определить причину и место возникновения неполадки при выходе BER за допустимые пределы. Цифровым системам связи свойственен пороговый эффект, когда минимальное ухудшение качества радиосигнала может привести к обрыву связи. Поэтому оценка близости системы к такому порогу срыва позволит установить запас по качеству радиосигналов, применяемых в системах связи. В связи с этим для количественной оценки качества радиосигналов с цифровой модуляцией широко применяется модуль вектора ошибки – error vector magnitude (EVM). Следует отметить, что EVM не имеет устоявшегося названия и определения на русском языке. В настоящей статье приведён вариант названия и определения с учётом отечественных и зарубежных источников [1–6].

Цель настоящего исследования – обеспечение единства измерений параметров сигналов с цифровой модуляцией, в частности модуля вектора ошибки EVM.

Определение EVM. EVM – это коэффициент искажения сигнала с цифровой модуляцией, который выражается в процентах или децибелах и рассчитывается как относительное среднеквадратическое значение длин векторов ошибок $|\mathbf{e}_k|$:

$$EVM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\mathbf{e}_k|^2} / P_n, \quad (1)$$

где N , k – количество и номер символов соответственно; P_n – коэффициент нормировки.

Вектор ошибки $\mathbf{e}_k$ представляет собой разность векторов комплексных огибающих принятого (анализируемого) $\mathbf{z}_k$ и опорного $\mathbf{r}_k$ сигналов в момент детектирования k -го символа:

$$\mathbf{e}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{r}_k.$$

Вектор ошибки $\mathbf{e}_k$ на комплексной плоскости представлен на рис. 1. За опорный сигнал принята идеальная математическая модель сигнала, вид модуляции и последовательность символов которого соответствует принятому сигналу. Длина модуля $|\mathbf{e}_k|$ вектора ошибки вычисляется после оцифровки и коррекции [1] принятого сигнала по амплитуде, фазе и частоте:

$$|\mathbf{e}_k| = \sqrt{(I_{i[k]} - I_{p[k]})^2 + (Q_{i[k]} - Q_{p[k]})^2},$$

где $I_{p[k]}$, $Q_{p[k]}$ и $I_{i[k]}$, $Q_{i[k]}$ – соответственно расчётные значения действительной и мнимой частей комплексной огибающей

опорного сигнала и измеренные значения действительной и мнимой частей комплексной огибающей анализируемого сигнала в момент детектирования k -го символа.

Значения $I_{p[k]}$, $Q_{p[k]}$, $I_{i[k]}$, $Q_{i[k]}$ изображены на комплексной плоскости в правой верхней части рис. 1 чёрными и красными точками соответственно, а также изображены на осциллограммах в левой верхней части рис. 1 соответственно чёрными и красными линиями.

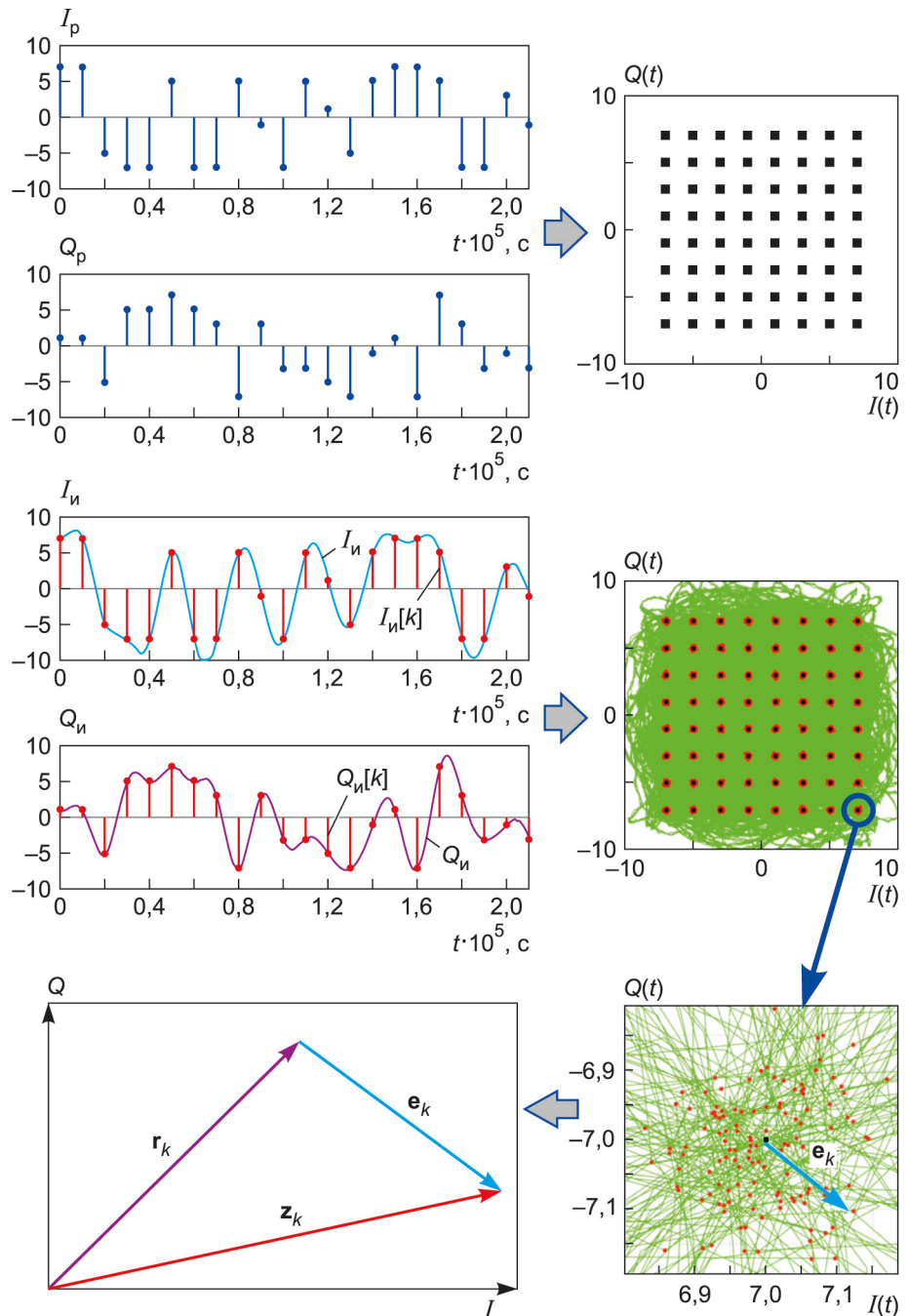


Рис. 1. Вектор ошибки $\mathbf{e}_k$ на комплексной плоскости, графики комплексных огибающих опорного и анализируемого сигналов и осциллограммы их действительных и мнимых частей

Fig. 1. Image of the error vector $\mathbf{e}_k$, complex envelopes of the reference and analyzed signals and waveforms of their real and imaginary parts

Коэффициент нормировки P_H можно рассчитывать различными способами в зависимости от стандарта связи. Наиболее часто коэффициент нормировки вычисляется как среднеквадратическое значение длин векторов $|\mathbf{r}_k|$ опорного сигнала:

$$P_H = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\mathbf{r}_k|^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (I_{p[k]}^2 + Q_{p[k]}^2)}. \quad (2)$$

Рассчитанное значение EVM даёт количественную оценку качества сигналов с цифровой модуляцией, т. е. степень отклонения символьных точек принятого сигнала относительно символьных точек опорного сигнала. При отклонении принятого сигнала от опорного по амплитуде и фазе в момент детектирования символов изменяется значение EVM.

Постановка задачи. В современных международных стандартах сотовой связи прописаны требования к передатчикам по значениям EVM. Консорциум 3rd Generation Partnership Project (3GPP), разрабатывающий международные стандарты мобильной связи, определил требования к характеристикам радиосигналов передатчиков по значениям EVM. Требования 3GPP TS 38.101-1 V16.0.0 [1] к радиопередатчикам сигналов в стандарте мобильной связи 5G: EVM не более 17,5; 12,5; 8,0; 3,5 % для модуляции видов QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM соответственно. К средствам измерений (СИ)

параметров радиосигналов с цифровой модуляцией, активно применяющихся при разработке и тестировании систем связи на соответствие стандартам по EVM, можно отнести векторные генераторы сигналов, анализаторы спектра, анализаторы цепей и цифровые осциллографы с опциями векторного анализа сигналов.

В документации производителей СИ параметров радиосигналов с цифровой модуляцией обычно указываются собственные значения EVM для векторных генераторов сигналов. Анализаторы спектра, осциллографы и анализаторы цепей с опцией векторного анализа функционально позволяют оценивать диапазон и точность измерений EVM.

В настоящее время актуально создание метрологической базы [7] для обеспечения измерений параметров радиосигналов с цифровой модуляцией, в основе которой будут лежать государственные первичные эталоны единиц величин. В частности, необходимо обеспечить метрологическую прослеживаемость параметра EVM к первичным эталонам для калибровки и поверки СИ параметров радиосигналов с цифровой модуляцией [8, 9].

Решение задачи. В существующих методах воспроизведения калибровочных сигналов с заданным значением EVM применяются эквивалентные сигналы [3, 8, 9], принципиально отличающиеся по спектральным и амплитудно-частотным характеристикам от сигналов с цифровой модуляцией,

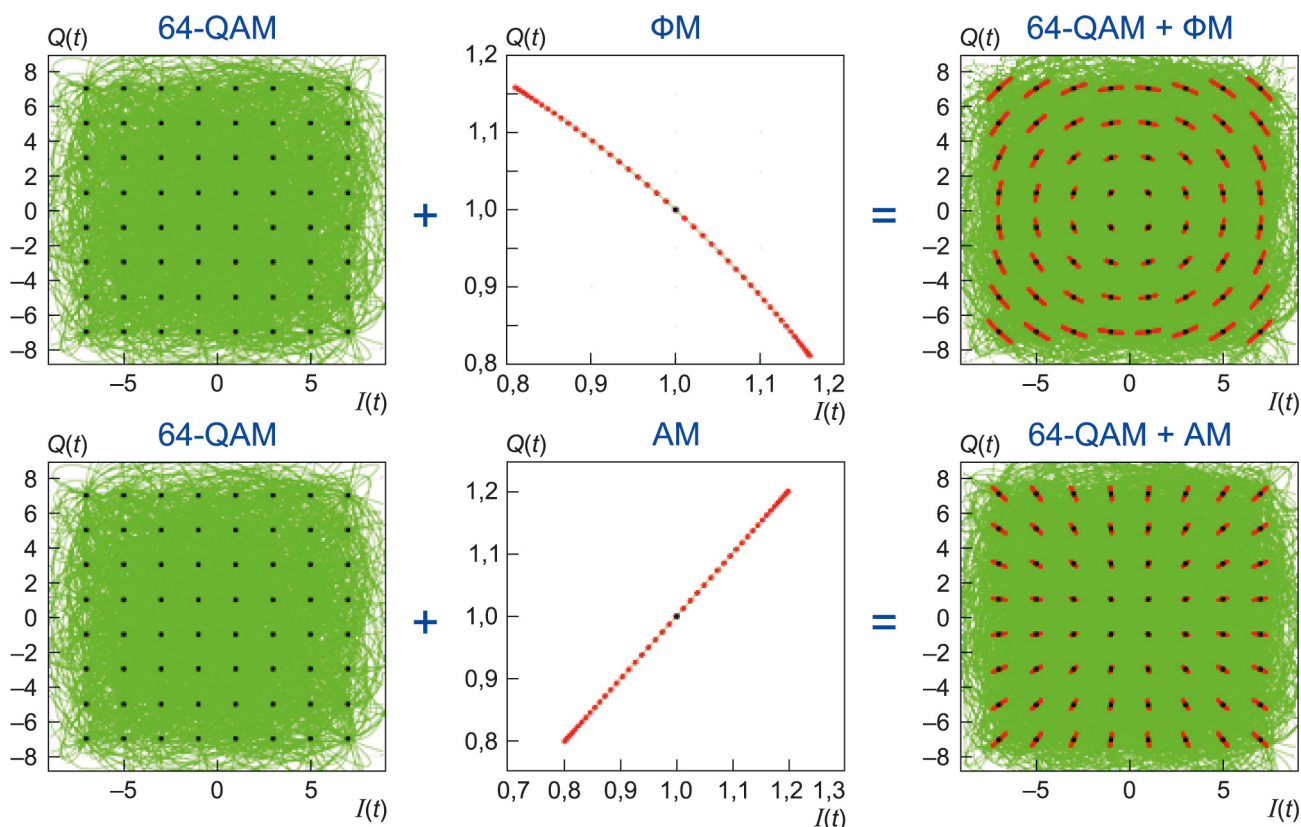


Рис. 2. Комплексная огибающая радиосигнала с модуляцией вида 64-QAM после добавления амплитудной АМ или фазовой ФМ модуляций

Fig. 2. Complex envelope of the 64-QAM signal after adding AM or PM

которые используются в системах связи. Обычно производители СИ параметров радиосигналов в документации указывают собственное значение или погрешность измерения EVM при определённых частоте несущей, виде модуляции, символьной скорости, типе фильтра и других параметров, указанных в требованиях стандартов связи. Это обусловлено тем, что сигнал будет искажаться по-разному при прохождении через тракт СИ в зависимости от перечисленных параметров. Поэтому применение эквивалентных сигналов даёт неполную оценку приборной погрешности измерения EVM.

В связи с этим авторами настоящей статьи разработан метод воспроизведения калибровочных сигналов с заданным значением EVM путём добавления нормированной помехи к реальному радиосигналу с цифровой модуляцией. В общем виде сигнал $s(t)$ с цифровой модуляцией можно описать формулой

$$s(t) = \operatorname{Re}[Z(t)\exp(j\omega_0 t)],$$

где $Z(t)$ – комплексная огибающая сигнала; ω_0 – несущая частота сигнала.

Комплексная огибающая сигнала определяется суммой $Z(t) = I(t) + jQ(t)$ действительной $I(t)$ и мнимой частей $Q(t)$, где $I(t) = a(t)\cos\varphi(t)$; $Q(t) = a(t)\sin\varphi(t)$; $a(t)$, $\varphi(t)$ – соответственно амплитуда и фаза комплексной огибающей.

Для формирования сигнала с заданным значением EVM необходимо внести искажения в амплитуду и фазу комплексной огибающей сигнала $Z(t)$. Рассмотрим добавление

гармонической амплитудной модуляции (АМ) $f_{AM}(t)$ и фазовой модуляции (ФМ) $f_{FM}(t)$ в качестве нормируемой помехи:

$$\begin{cases} f_{AM}(t) = m\cos(2\pi f_M t); \\ f_M \ll f_C; \end{cases}$$

$$\begin{cases} f_{FM}(t) = \frac{\varphi_d \pi}{180} \cos(2\pi f_M t); \\ f_M \ll f_C, \end{cases}$$

где m – коэффициент амплитудной модуляции; f_M – модулирующая частота; f_C – частота следования символов; φ_d – девиация фазы.

После добавления АМ и ФМ действительная и мнимая части комплексной огибающей сигнала $Z_1(t)$, а также сигнал $s_1(t)$ будут описываться формулами

$$I_1(t) = a(t)[1 + f_{AM}(t)]\cos[\varphi(t) + f_{FM}(t)];$$

$$Q_1(t) = a(t)[1 + f_{AM}(t)]\sin[\varphi(t) + f_{FM}(t)];$$

$$s_1(t) = \operatorname{Re}[Z_1(t)\exp(j\omega_0 t)].$$

На рис. 2 представлена комплексная огибающая $Z_1(t)$ радиосигнала с видом модуляции 64-QAM после добавления АМ или ФМ. В этом случае заданное значение EVM рассчитывается по формуле (1), где в качестве комплексных огибающих опорного и принятого сигналов принимаются $Z(t)$ и $-Z_1(t)$.

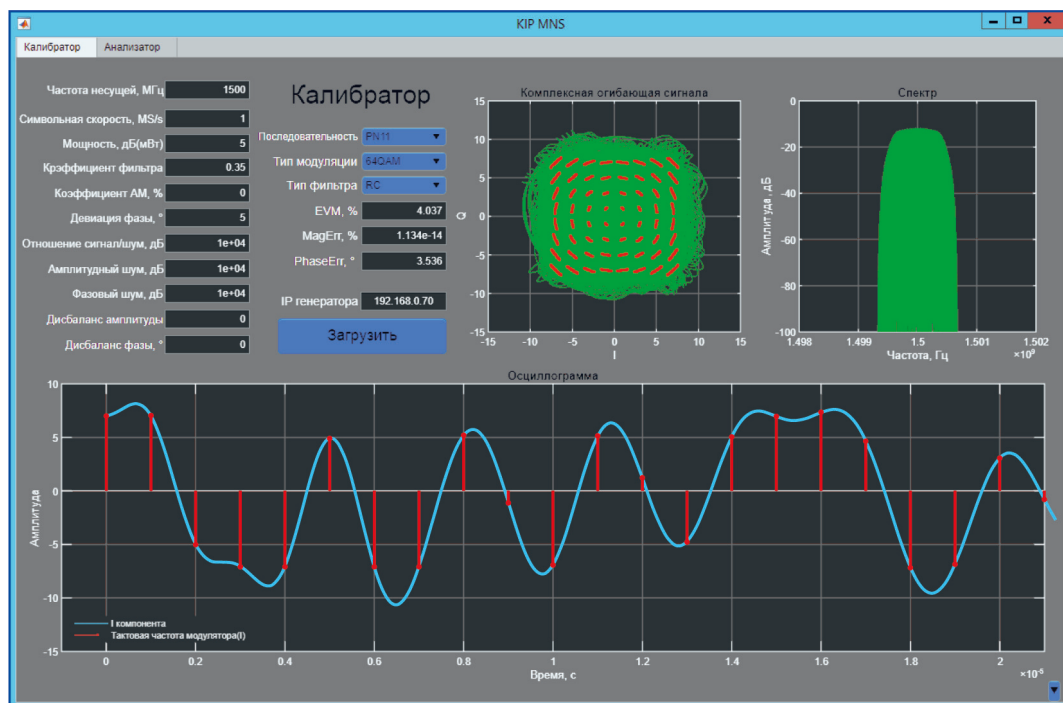


Рис. 3. Диалоговое окно программного обеспечения калибратора EVM

Fig. 3. The EVM calibrator software window

Математическая модель модулированного сигнала с нормируемой помехой реализована в разработанном авторами настоящей статьи программном обеспечении. Сигналы воспроизводятся генератором сигналов произвольной формы (ГСПФ). Метод воспроизведения калибровочных сигналов с заданным значением EVM также был опробован и с использованием векторного генератора сигналов, но с учётом качественно сопоставимых результатов в настоящей статье приведены только результаты применения ГСПФ.

В качестве ГСПФ применён генератор M8190A, к его функциональным возможностям относится запись в память программно сформированного сигнала для последующего воспроизведения. На рис. 3 представлено диалоговое окно программного обеспечения калибратора EVM. В настоящее время созданное программное обеспечение позволяет формировать сигналы с цифровой модуляцией (например, видов QAM16-256, BPSK, QPSK и др.) и фильтрами типа «приподнятый косинус – RC-фильтр» и «корень из приподнятого косинуса – RRC-фильтр», а также с помехами различных видов, которые можно описать математически и воспроизвести на ГСПФ (паразитными АМ и ФМ, белым и фазовым шумами, смещением частоты несущей,

дисбалансом квадратур и т. д.). Такие широкие функциональные возможности калибратора EVM на основе ГСПФ и разработанного программного обеспечения потенциально дают возможность оценивать не только точность измерения EVM, но и устойчивость технических средств, например модемов, к помехам разных видов.

С целью установления шкалы воспроизведения EVM оценена погрешность воспроизведения коэффициента m и девиации фазы калибратором на основе ГСПФ по Государственному первичному эталону единицы коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний ГЭТ 180-2010 и Государственному первичному эталону единицы девиации частоты ГЭТ 166-2020 соответственно. Измерения проведены на несущей $\omega_0=1$ ГГц и модулирующей $f_m=1$ кГц частотах. Выбор данных параметров обусловлен частотными диапазонами применяемых первичных эталонов и близостью к несущим частотам действующих систем связи. Результаты измерений приведены в табл. 1, 2, где m_y , m_i , Δm и $\varphi_{д.у}$, $\varphi_{д.и}$, $\Delta\varphi_{д.}$ – установленное и измеренное значения, а также абсолютные погрешности воспроизведения коэффициента m и девиации фазы соответственно.

Также экспериментально исследованы возможности калибровки анализаторов спектра (модель N9040B с опцией векторного анализа сигналов) по значению EVM для сигналов с модуляцией 64-QAM. Параметры калибровочных сигналов: $\omega_0=1$ ГГц; $f_c=1$ МГц; RC-фильтр с коэффициентом сглаживания 0,35; псевдослучайная последовательность вида PN-11. Применение псевдослучайной последовательности позволяет получить равномерный спектр и равномерное распределение символов на диаграмме созвездия калибровочного сигнала, что уменьшает методическую погрешность воспроизведения EVM.

Значения EVM калибровочных сигналов с нормированной помехой рассчитаны по формуле (1) с учётом установленных параметров АМ и ФМ, а также с использованием фактических результатов (см. табл. 1, 2). Коэффициент нормировки P_n рассчитан по формуле (2). Результаты оценки представлены на рис. 4, согласно которому отличие воспроизводимых и измеренных значений EVM составило 0,005–0,130 %. При этом минимальные и максимальные отличия были получены при значениях EVM соответственно более 1 и 0,1 %. Такое отклонение значений EVM обусловлено отличием программной модели сигнала от реального выходного сигнала калибратора. Нелинейность тракта ГСПФ и в большей степени шумы искажают сформированный сигнал, что в свою очередь уменьшает точность воспроизведения значения EVM.

Заключение. Разработанный метод воспроизведения сигналов с цифровой модуляцией позволяет задавать значение EVM путём добавления к сигналу нормированной помехи. Рассмотренный частный случай предложенного метода с применением в качестве нормируемой помехи гармонических сигналов АМ и ФМ экспериментально подтвердил возможность передачи единиц коэффициента амплитудной модуляции и девиации фазы от ГЭТ 180-2010 и ГЭТ 166-2020 к калибратору параметров сигналов с цифровой модуляцией на основе ГСПФ.

Таблица 1

Погрешность воспроизведения коэффициента m калибратором с ГСПФ

m_y , %	m_i , %	Δm , %
0	0,003	0,003
0,2	0,216	0,016
0,5	0,513	0,013
1,0	1,009	0,009
2,0	2,000	0,000
4,0	4,004	0,004
5,0	4,998	–0,002

Таблица 2

Погрешность воспроизведения девиации фазы калибратором с ГСПФ

$\varphi_{д.у}$, °	$\varphi_{д.и}$, °	$\Delta\varphi_{д.}$, °
0	0,127	0,127
0,2	0,240	0,040
0,5	0,511	0,011
1,0	1,003	0,003
2,0	1,996	–0,004
4,0	4,003	0,003
5,0	5,006	0,006

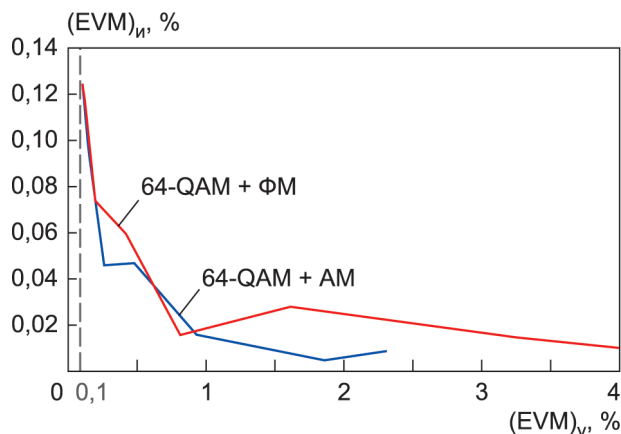


Рис. 4. Графики зависимости измеренных $(EVM)_i$ от установленных $(EVM)_y$ значений модуля вектора ошибки

Fig. 4. Plots of measured EVM values versus set

Список источников

References

1. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access. Network Base Station (BS) conformance testing (FDD) (Release 16), Dec. 2018.
2. Шостко И. С., Деревянко Н. В. Анализ влияния искажающих факторов на качество сигнала эфирной цифровой телевизионной системы DVB // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2015. Вып. 182. С. 51–57.
3. Zhang Rui, Zhou Feng, Guo Long-qing, Wang Nan, *75th ARFTG Microwave Measurement Conference*, 28 May 2010, Anaheim, CA, USA, IEEE, 2010.
<https://doi.org/10.1109/ARFTG.2010.5496333>
4. Hudlicka M., Laboratory System for a Traceable Measurement of Error Vector Magnitude, *39th European Microwave Conference (EuMC)*, 29 Sept. – 1 Oct. 2009, Rome, Italy.
5. Humphreys D. A., Harper M. R., McInnes L. K. J., Miall J., Strategy for traceability of complex modulated signals using RF waveform metrology, *Proc. of XXIX URSI General Assembly*, Chicago, USA, Aug. 2008, A03.6.
6. Zhang Rui, Zhou Feng, Gu Long-qing, Wang Nan, *CPEM 2010*, June 13–18, 2010, Daejeon, Korea (South) IEEE, 2010, pp. 361–362. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2010.5543533>
7. Малай И. М., Баженов Н. Р., Мильников А. В. Новые задачи метрологического обеспечения измерений параметров радиотехнических сигналов // Альманах современной метрологии. 2019. № 2 (18). С. 23–36.
8. Могилев И. В., Стальнова К. А. Калибровка измерителей параметров сигналов с цифровой модуляцией по величине амплитудной и фазовой ошибок с применением гармонических сигналов с амплитудной и фазовой модуляцией // Материалы VIII Научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке», Менделеево, 21 марта 2019. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2019. С. 147–152.
9. Стальнова К. А., Титаренко А. В. Исследование возможности использования метода «эквивалентных сигналов» для воспроизведения сигналов с нормированной величиной модуля вектора // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2018. Т. 8. № 2. С. 212–217.
1. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access. Network Base Station (BS) conformance testing (FDD) (Release 16), Dec. 2018.
2. Shostko I., Derevyanko N., Analysis of distorting factors action on the signal quality of digital terrestrial television system DVB, *Radio engineering*, 2015, iss. 182, pp. 51–57. (In Russ.)
3. Zhang Rui, Zhou Feng, Guo Long-qing, Wang Nan, *75th ARFTG Microwave Measurement Conference*, 28 May 2010, Anaheim, CA, USA, IEEE, 2010.
<https://doi.org/10.1109/ARFTG.2010.5496333>
4. Hudlicka M., Laboratory System for a Traceable Measurement of Error Vector Magnitude, *39th European Microwave Conference (EuMC)*, 29 Sept. – 1 Oct. 2009, Rome, Italy.
5. Humphreys D. A., Harper M. R., McInnes L. K. J., Miall J., Strategy for traceability of complex modulated signals using RF waveform metrology, *Proc. of XXIX URSI General Assembly*, Chicago, USA, Aug. 2008, A03.6.
6. Zhang Rui, Zhou Feng, Gu Long-qing, Wang Nan, *CPEM 2010*, June 13–18, 2010, Daejeon, Korea (South) IEEE, 2010, pp. 361–362. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2010.5543533>
7. Bazhenov N. R., Mylnikov A. V., Malay I. M., New tasks of metrological assurance of measurements of parameters of radiotechnical signals, *Al'manac of Modern Metrology*, 2019, no. 2 (18), pp. 23–36. (In Russ.)
8. Mogilev I. V., Stalnova K. A., Calibration of meters of parameters of signals with digital modulation in terms of amplitude and phase errors using harmonic signals with amplitude and phase modulation, *Abstracts of the report at the VIII scientific-practical conference of young scientists, graduate students and specialists "Metrology in the XXI century"*, Mendeleevo, 21 March 2019, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2019, pp. 147–152. (In Russ.)
9. Stalnova K. A., Titarenko A. V., Investigation of the method of "equivalent signals" for the reproduction of signals with a normalized error vector magnitude, *Digital signal processing application considerations*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 212–217. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 16.02.2022; одобрена после рецензирования 25.02.2022; принята к публикации 01.03.2022.
The article was submitted 16.02.2022; approved after reviewing 25.02.2022; accepted for publication 01.03.2022.

Научная статья

УДК 621.373.7

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-62-68>

Измерение волнового сопротивления микрополосковой линии векторным анализатором цепей

Елена Александровна Лупанова¹, Сергей Михайлович Никулин²✉

^{1, 2} Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

¹elupanova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6389-9939>

²nikulin-serg2006@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3906-8371>

Аннотация. Предложен способ измерения волнового сопротивления микрополосковой линии передачи векторным анализатором цепей. Проблема определения частотной зависимости волнового сопротивления микрополосковой линии актуальна для создания схемных моделей электронных компонентов и touchstone-файлов в виртуальном полосковом канале со стандартным волновым сопротивлением 50 Ом. Схемные модели компонентов и файлы используются в системах автоматизированного проектирования интегральных микроволновых устройств. Задачу измерения векторным анализатором цепей во всем частотном диапазоне работы предложено решить LTR-методом. По результатам измерений анализатором цепей в коаксиальном канале S-параметров и коэффициентов отражения двух отрезков короткой и электрически длинной микрополосковой линий передачи определены фазовая скорость и коэффициент затухания электромагнитной волны, распространяющейся в полосковой линии передачи, а также трансформированные s-параметры двух искажающих адаптеров, моделирующие области контакта коаксиальных и полосковых линий. В диапазоне 0,02–2,00 ГГц волновое сопротивление найдено по коэффициентам отражения со стороны коаксиальных портов искажающих адаптеров в двух фиксированных частотных точках, в которых реактивная ёмкостная составляющая комплексного волнового сопротивления компенсируется индуктивностью областей контакта коаксиальной и полосковой линий. Частотная зависимость действительной части волнового сопротивления, проходящая через эти частотные точки, в диапазоне частот работы анализатора цепей определена с помощью схемной модели микрополоскового стандарта Битти в системе автоматизированного проектирования NI AWR Design Environment. Модель этого стандарта линии с воздушным участком между двумя отрезками полосковых линий с изоляционным основанием получена с помощью схемного аналога MLIN, адекватного физическому прототипу линии. Актуальность измерения волнового сопротивления микрополосковой линии векторным анализатором цепей показана на примере идентификации собственных параметров чип-резисторов.

Ключевые слова: микрополосковая линия, волновое сопротивление, эффективная диэлектрическая проницаемость, S-параметры, векторный анализатор цепей, LTR-метод, стандарт Битти, система автоматизированного проектирования, схемная модель, чип-резистор

Для цитирования: Лупанова Е. А., Никулин С. М. Измерение волнового сопротивления микрополосковой линии векторным анализатором цепей // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 62–68. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-62-68>

Measurement of the impedance of a microstrip line with a vector network analyzer

Elena A. Lupanova¹, Sergey M. Nikulin²✉

^{1, 2} Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

¹elupanova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6389-9939>

²nikulin-serg2006@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3906-8371>

Abstract. A method for measuring the wave impedance of a microstrip transmission line with a vector network analyzer is proposed. The problem of determining the frequency dependence of the wave impedance of a microstrip line is relevant for creating circuit models of electronic components and touchstone files in a virtual strip channel with a standard wave impedance of 50 Ohm, used in computer-aided design systems for integrated microwave devices. The problem of measuring with a vector network analyzer in the entire frequency range of the device operation is proposed to be solved by the LTR method. This method makes it possible to determine, from the results of measurements by a network analyzer in a coaxial channel, the S-parameters and reflection coefficients of two segments: a short and an electrically long microstrip transmission line: phase velocity and attenuation coefficient of electromagnetic waves propagating in a stripline transmission line; transformed s-parameters of distorting adapters, simulating the contact areas of coaxial and strip lines. In the range from 0.02–2.00 GHz, the impedance is determined by the reflection coefficients from the side of the coaxial ports of the distorting adapters at two fixed frequency points. At these frequency points, the reactive capacitive component of the complex wave impedance is compensated by the inductance of the contact areas of the coaxial and strip lines. The frequency dependence of the real part of the wave impedance passing through the frequency points in the frequency range

of the network analyzer is obtained using the circuit model of the Beatty microstrip standard in the NI AWR Design Environment computer-aided design system. The model of this standard for a line with an air section between two segments of strip lines with an insulating base was obtained using a circuit analog of MLIN, which is adequate to the physical prototype of the line. The relevance of measuring the wave impedance of a microstrip line with a vector network analyzer is shown by the example of identifying the intrinsic parameters of chip resistors.

Keywords: microstrip line, impedance, effective permittivity, S-parameters, vector network analyzer, LTR method, Beatty standard, computer-aided design system, circuit model, chip resistor

Введение. При определении собственных параметров схемных моделей электронных компонентов в микрополосковых линиях передачи по результатам измерения S-параметров компонентов необходимо исключать негативное влияние искажающих адаптеров, используемых для подключения объектов к анализаторам цепей с коаксиальными соединителями. Волновое сопротивление микрополосковой линии передачи, в которую устанавливается контролируемый электронный компонент, является неизвестным частотно-зависимым параметром. Собственные параметры схемных моделей электронных компонентов связаны с реальной частью комплексного волнового сопротивления $\text{Re}[\dot{Z}_B(f)]$, мнимую часть $\text{Im}[\dot{Z}_B(f)]$ обычно не принимают во внимание ввиду её малости (не более 1,2 Ом), и далее для упрощения записи действительную часть обозначим $Z_B(f)$.

Частотная зависимость $Z_B(f)$ микрополосковой линии определяется её конструкцией, геометрией поперечного сечения, относительной диэлектрической проницаемостью изоляционного основания и другими факторами, которые не поддаются точному оцениванию и аналитическому моделированию. В работе [1] предложена аналитическая модель волнового сопротивления. Параметры этой модели в принципе можно установить в процессе сверхвысокочастотных (СВЧ) измерений, однако пока невозможно установить достоверность получаемых оценок, поскольку параметры модели предлагается находить оптимизацией целевых функций на основе измерительной информации, которую нельзя верифицировать и стандартизировать.

Электронный компонент как неоднородность в линии передачи вызывает локальное возмущение зондирующей электромагнитной волны, связанное с возникновением нераспространяющихся волн высших типов. Причём характер возмущения определяется и электронным компонентом, и линией передачи, в которую он установлен. В этой связи возникает вопрос о правомерности поиска собственных параметров электронных компонентов, инвариантных к линиям передачи.

Цель настоящего исследования – разработать способ измерения волнового сопротивления микрополосковых линий передачи векторным анализатором цепей в широком диапазоне частот. При этом данный способ должен иметь логическую основу, доказательную базу и высокую точность получаемых оценок. Для достижения поставленной цели в настоящей статье следует решить следующие задачи: предложить широкополосный метод измерения фазовой скорости и коэффициента затухания электромагнитной

волны в микрополосковой линии передачи и s-параметров искажающих адаптеров; разработать способ измерения волнового сопротивления векторным анализатором цепей в частотных точках в низкочастотной части СВЧ-диапазона; получить частотную зависимость волнового сопротивления в широком диапазоне частот, проходящую через найденные частотные точки в низкочастотной части СВЧ-диапазона; показать эффективность и целесообразность использования полученного инструментальными методами волнового сопротивления для идентификации параметров схемных моделей электронных компонентов; оценить правомерность поиска собственных параметров электронных компонентов, инвариантных к линиям передачи и контактными площадкам.

LTR-метод измерения S-параметров электронных компонентов. LTR-метод отличается от известного TRL-метода [2] принципиально иным способом измерения S-параметров электронных компонентов в микрополосковой линии передачи и лишён главного недостатка TRL-метода, обусловленного ограничением диапазона частот, в котором определяются искомые параметры. В LTR-методе реализована новая процедура определения S-параметров искажающих адаптеров и постоянной распространения – соответственно фазовой скорости $v(f)$ и коэффициента затухания $\alpha(f)$ электромагнитной волны в линии передачи. Использование электрически длинной микрополосковой линии передачи в L-соединении коаксиально-полосковых переходов позволяет сначала найти коэффициенты отражения со стороны коаксиальных портов адаптеров на массиве базовых точек во всём диапазоне работы анализатора цепей, а затем и все S-параметры адаптеров и постоянную распространения электромагнитной волны на всех рабочих частотах прибора. Верхняя граница частотного диапазона применения LTR-метода определяется условиями распространения основного типа электромагнитной волны в микрополосковой линии передачи. Метод характеризуется минимальным комплектом полосковых калибровочных мер. Калибровочный набор состоит из микрополосковых линий: электрически длинной в L-соединении и короткой в T-соединении переходов. R-соединение каждого из переходов образуется подключением к нему короткой (рис. 1) либо длинной линии.

Реактивные сопротивления X_a , X_b искажающих адаптеров A, B обозначают области контакта коаксиальной и полосковой линий, каждый адаптер образован коаксиально-полосковым переходом и отрезком микрополосковой линии длиной $l/2$ либо $L/2$ (см. рис. 1).

Коэффициенты отражения $S_{11}^a(f)$, $S_{11}^b(f)$ со стороны коаксиальных портов искажающих адаптеров вначале определяют на массиве частотных точек f_n , $n=1, 2, \dots$, по результатам измерений S -параметров L - и T -соединений переходов из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} S_{11}^a(f_n) &= \frac{S_{11}^L S_{12}^T - S_{11}^T S_{12}^L T(f_n)}{S_{12}^T - S_{12}^L T(f_n)}, \\ S_{11}^b(f_n) &= \frac{S_{22}^L S_{21}^T - S_{22}^T S_{21}^L T(f_n)}{S_{21}^T - S_{21}^L T(f_n)}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Волновую функцию $T(f_n) = \exp(-i\gamma\Delta L)$ (γ – постоянная распространения электромагнитной волны в полосковой линии; $\Delta L = L - l$ – разность длин отрезков линий в L - и T -соединениях) получают дифференциально-фазовым методом [3] из отношения коэффициентов передачи $T(f_n) = S_{21}^L(f_n)/S_{21}^T(f_n)$, при котором аргумент $T(f_n)$ принимает значения $\pm\pi/2$. Затем на массиве частотных точек выполняется кусочная интерполяция всего диапазона сплайнами Акимы [4], в результате которой находят коэффициенты отражения $S_{11}^a(f)$, $S_{11}^b(f)$ во всём диапазоне частот. Остальные параметры искажающих адаптеров определяют из соотношений

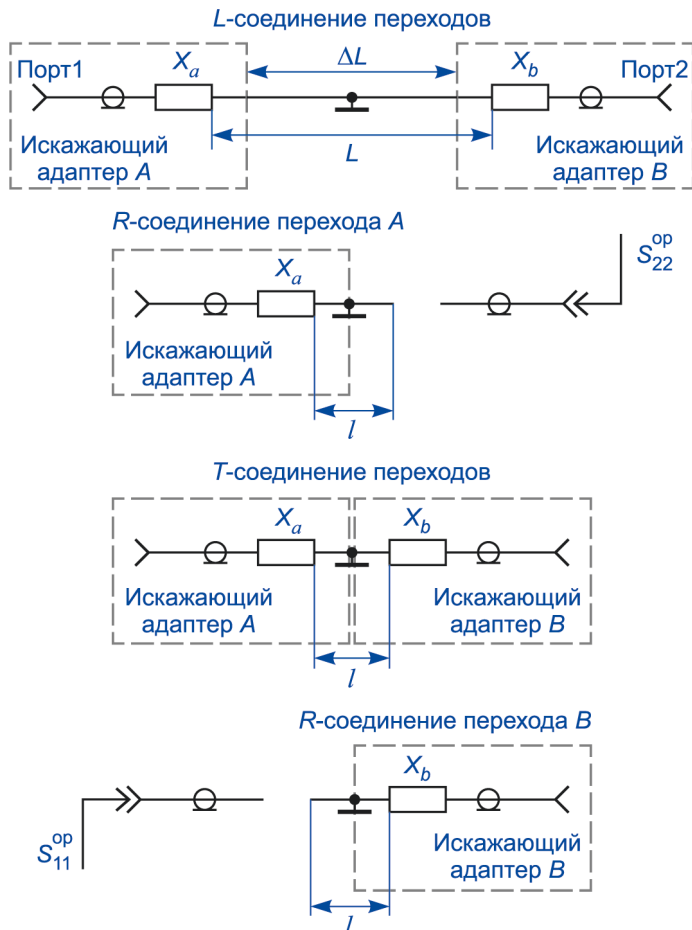


Рис. 1. Схема L -, T - и R -соединений переходов в LTR-методе

Fig. 1. Scheme of L -, T -, and R -junction connections in the LTR-method

$$\left. \begin{aligned} S_{22}^a &= K(S_{22}^T - S_{11}^b)/S_{12}^T; \\ S_{22}^b &= (S_{11}^T - S_{11}^a)/(KS_{12}^T); \\ S_{21}^a S_{12}^a &= KS_{21}^T(1 - S_{22}^a S_{22}^b); \\ S_{21}^b S_{12}^b &= S_{12}^T(1 - S_{22}^a S_{22}^b)/K; \\ S_{21}^a S_{12}^b &= S_{21}^T(1 - S_{22}^a S_{22}^b); \\ S_{21}^b S_{12}^a &= S_{12}^T(1 - S_{22}^a S_{22}^b). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Коэффициент K в (2) рассчитывают с учётом результатов измерений коэффициентов отражения R -соединения переходов:

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_a &= \frac{S_{11}^R - S_{11}^a}{S_{11}^R S_{22}^a - S_{11}^a S_{22}^a + S_{21}^a S_{12}^a}; \\ \Gamma_b &= \frac{S_{22}^R - S_{11}^b}{S_{22}^R S_{22}^b - S_{11}^b S_{22}^b + S_{21}^b S_{12}^b}; \\ K &= \sqrt{\frac{\Gamma_b(S_{11}^R - S_{11}^a)(1 - S_{22}^a \Gamma_a)}{\Gamma_a(S_{22}^R - S_{11}^b)(1 - S_{22}^b \Gamma_b)}}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Последний шаг вычислительной процедуры поиска S -параметров искажающих адаптеров – определение точного значения волновой функции $T(f)$

$$\left. \begin{aligned} T(f) &= \frac{S_{21}^L(f) S_{12}^a S_{21}^b}{S_{22}^a (S_{22}^b \det S^L - S_{11}^L \det S^b) + (\det S^b - S_{22}^L S_{22}^b) \det S^a}; \\ \det S^a &= S_{11}^a S_{22}^a - S_{21}^a S_{12}^a; \det S^b = S_{11}^b S_{22}^b - S_{21}^b S_{12}^b; \\ \det S^L &= S_{11}^L S_{22}^L - S_{21}^L S_{12}^L \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

и получение нового массива частотных точек f_n , при котором аргумент $T(f_n)$ принимает значения $\pm\pi/2$. Итерационная процедура поиска S -параметров искажающих адаптеров (1)–(4) быстро сходится. На первом шаге итерационного процесса параметр K следует приравнять единице, на четвёртом шаге поиск искомых параметров можно остановить.

Фазовую скорость, коэффициент затухания электромагнитной волны в микрополосковой линии передачи и относительную эффективную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{эфф}$ находят из соотношений

$$\left\{ \begin{aligned} v(f) &= -2\pi f \Delta L / \arg[T(f)]; \\ \alpha(f) &= -\ln|T(f)| / \Delta L; \\ \epsilon_{эфф}(f) &= [v_0 / v(f)]^2. \end{aligned} \right.$$

Исключение из результатов измерений S -параметров искажающих адаптеров выполняется с помощью известной процедуры [1, 2].

Измерение волнового сопротивления в диапазоне 0,02–2,00 ГГц. Волновое сопротивление $Z_{\text{в}}$ является комплексной величиной в силу конечной проводимости плёнки

проводника микрополосковой линии и отличного от нуля тангенса угла диэлектрических потерь изоляционного основания [5]:

$$\dot{Z}_B = Z_B - iZ_B[R_1/(\omega L_1) - G_1/(\omega C_1)]/2,$$

где $Z_B = \sqrt{L_1/C_1}$; L_1 , C_1 , R_1 , G_1 – соответственно индуктивность, ёмкость, сопротивление и проводимость лестничной эквивалентной схемы линии с распределёнными параметрами [3].

В области контакта коаксиально-полоскового перехода с полосковой линией возникает возмущение электромагнитного поля, которое можно интерпретировать как неоднородность индуктивного характера. Существуют две дискретные частоты f_1 , f_2 , при которых наблюдается полная компенсация ёмкостной составляющей волнового сопротивления индуктивной неоднородностью области контакта. Этот эффект можно обнаружить с помощью LTR-метода в частотной зависимости коэффициентов отражения $S_{11}^a(f)$ и $S_{11}^b(f)$ со стороны коаксиальных портов искажающих адаптеров, если перенести внешние границы адаптеров к областям контакта коаксиальных и микрополосковых линий. Процедура переноса $S_{ik}(f) \rightarrow s_{ik}(f)$, $i, k=1,2$, внешних границ адаптеров к областям контакта переходов с микрополосковой линией описывается соотношениями

$$\begin{cases} s_{11}(f) = S_{11}(f)/S_{11}^{op}(f); \\ s_{22}(f) = S_{22}(f)/S_{22}^{op}(f); \\ s_{21}(f) = 2S_{21}(f)/[S_{11}^{op}(f) + S_{22}^{op}(f)]; \\ s_{12}(f) = 2S_{12}(f)/[S_{11}^{op}(f) + S_{22}^{op}(f)], \end{cases}$$

где $S_{11}^{op}(f)$, $S_{22}^{op}(f)$ – коэффициенты отражения от коаксиально-полосковых переходов в режиме холостого хода (open) без контакта с полосковой линией, как показано на рис. 1.

Численные оценки волновых сопротивлений $Z_B^a(f_1)$, $Z_B^b(f_2)$ получены из результатов измерений S-параметров L-, T- и R-соединений коаксиально-полосковых переходов 292-04A-5 с экранированными микрополосковыми линиями. Линии длиной 30 и 120 мм изготовлены из фольгированного материала RO4003C (ROGERS Corp., США).

Частоты f_1 , f_2 , на которых ёмкостная составляющая волнового сопротивления компенсируется индуктивностями областей контактов переходов с микрополосковой линией, определяют из следующих условий:

$$\begin{cases} X_B^a(f_1) = \frac{100 \operatorname{Im}(s_{11}^a(f_1))}{1 - 2\operatorname{Re}(s_{11}^a(f_1)) + |s_{11}^a(f_1)|^2} = 0; \\ X_B^b(f_2) = \frac{100 \operatorname{Im}(s_{11}^b(f_2))}{1 - 2\operatorname{Re}(s_{11}^b(f_2)) + |s_{11}^b(f_2)|^2} = 0. \end{cases}$$

Оценки волновых сопротивлений находят как

$$\begin{cases} Z_B^a(f_1) = \frac{50(1 - |s_{11}^a(f_1)|^2)}{1 - 2\operatorname{Re}(s_{11}^a(f_1)) + |s_{11}^a(f_1)|^2}; \\ Z_B^b(f_2) = \frac{50(1 - |s_{11}^b(f_2)|^2)}{1 - 2\operatorname{Re}(s_{11}^b(f_2)) + |s_{11}^b(f_2)|^2}. \end{cases}$$

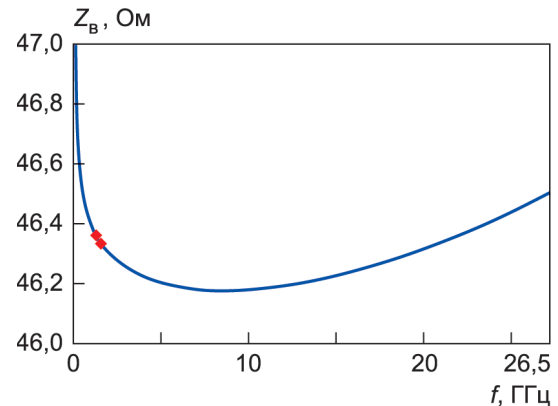


Рис. 2. Частотная зависимость волнового сопротивления микрополосковой линии

Fig. 2. Frequency dependence of the wave impedance of a microstrip line

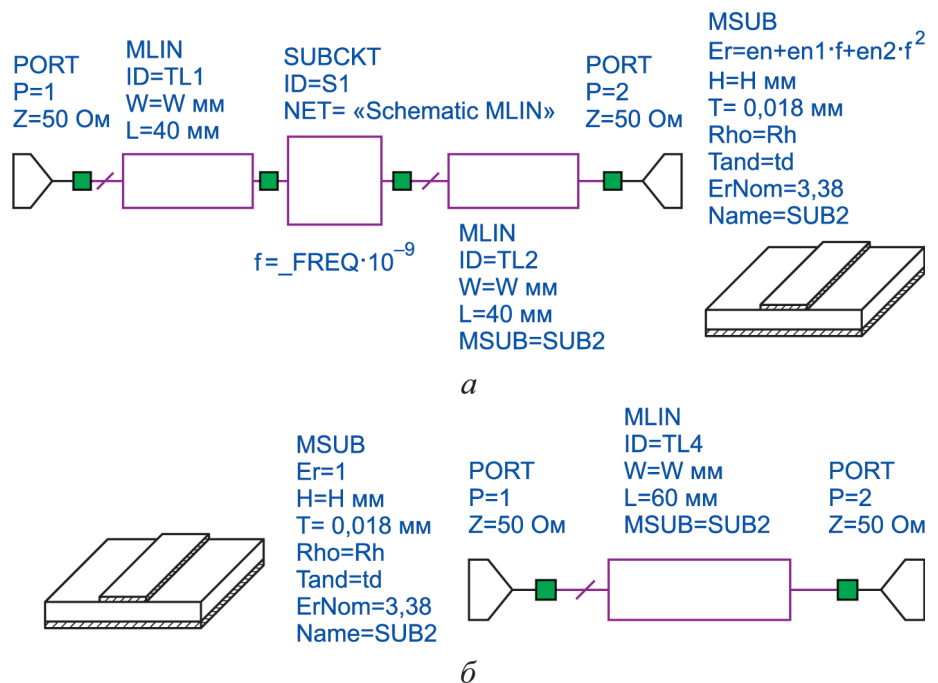


Рис. 3. Схемная реализация стандарта Битти: трёхсекционная схемная модель из отрезков микрополосковых линий передачи (а) и схемная модель полосковой линии с воздушным диэлектриком (б); PORT – модель порта, к которому подключается микрополосковая линия; MLIN – схемная модель микрополосковой линии; SUBCKT – блок, моделирующий воздушную полосковую линию; MSUB – схемная модель изоляционного основания микрополосковой линии

Fig. 3. Circuit implementation of the Beatty standard: three-section circuit model of segments of microstrip transmission lines (a); circuit model of a strip line with an air dielectric (b); PORT is the model of the port to which the microstrip line is connected; MLIN is the schematic model of the microstrip line; SUBCKT is the block simulating the overhead strip line; MSUB is the schematic model of the insulating base of the microstrip line

Полученные оценки волнового сопротивления (рис. 2) отмечены двумя точками красного цвета, их среднее значение и отклонение от среднего значения составляют 46,21 и $\pm 0,13$ Ом соответственно. Малая разница между частотами f_1, f_2 свидетельствует о высоком качестве переходов 292-04A-5 и экспериментально подтверждает существование частотной зависимости волнового сопротивления микрополосковой линии в низкочастотной области СВЧ-диапазона.

Определение частотной зависимости волнового сопротивления методом стандарта Битти. Ключевое значение при определении волнового сопротивления микрополосковой линии в СВЧ-диапазоне имеют относительная эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{\text{эфф}}$ и коэффициент затухания α . В [1] показано, что при решении этой задачи точность LTR-метода выше точности дифференциально-фазового метода [3]. Схемную модель микрополосковой линии MLIN, адекватную её физическому прототипу, можно получить с использованием средств оптимизации и частотных зависимостей $\varepsilon_{\text{эфф}}(f)$ и $\alpha(f)$ в системе автоматизированного проектирования AWR. В результате построения схемного аналога устанавливают аналитическую частотную зависимость относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_r(f)$ изоляционного основания

$$\varepsilon_r(f) = a_0 + a_1 f + a_2 f^2 \quad (5)$$

и параметр $Rh_0 > 1$, задающий сопротивление плёнки проводника относительно меди. Зависимость (5) не столько характеризует истинное значение диэлектрической проницаемости изоляционного основания, сколько моделирует влияние конструктивных особенностей объекта измерений, например, экранированные слои в верхней части изоляционного основания, зазор между полосковым проводником и экраном, диаметр металлизированных отверстий и расстояние между ними.

Частотную зависимость $\dot{Z}_B(f)$ следует определять методом стандарта Битти [2]. Для микрополосковой линии таким стандартом является отрезок воздушной линии без изоляционного основания. Техническая реализация микрополоскового стандарта не представляется возможной, поэтому использованы средства автоматизированного проектирования AWR. На рис. 3, а показана схемная модель микрополоскового стандарта Битти. Между двумя отрезками микрополосковых линий произвольной длины, например 40 мм, включают блок SUBCKT, моделирующий воздушную полосковую линию длиной, например 60 мм (рис. 3, б).

Волновые параметры $S_{ik}^{\text{air}}(f)$, $i, k = 1, 2$, отрезка полосковой линии с воздушным диэлектриком в канале с волновым сопротивлением $\dot{Z}_B(f)$ позволяют определить отношение волновых сопротивлений

$$r(f) = Z_0(f) / \dot{Z}_B(f),$$

где $Z_0(f)$ – волновое сопротивление полосковой линии с воздушным диэлектриком, с помощью быстросходящейся итерационной процедуры

$$\left. \begin{aligned} r(f) &= \frac{1 + S_{11}^{\text{air}}(f) - S_{21}^{\text{air}}(f)t(f)}{1 - S_{11}^{\text{air}}(f) - S_{21}^{\text{air}}(f)t(f)}; \\ t(f) &= \frac{S_{21}^{\text{air}}(f)[r(f)+1]^2}{4r(f)} \left\{ 1 - \left[\frac{r(f)-1}{r(f)+1} t(f) \right]^2 \right\} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

На первом шаге вычислений (6) следует предположить $t(f) = 0$.

Искомые S-параметры полосковой линии с воздушным диэлектриком $S_{ik}^{\text{air}}(f)$ получают экстракцией портов 50 Ом с отрезками полосковых линий длиной 40 мм из трёхкаскадного соединения линий (см. рис. 3, а). Процедуру экстракции выполняют экспресс-методом [5]. С этой целью следует собрать двухкаскадную электрическую цепь из трёхкаскадной цепи (см. рис. 3, б), удалив средний блок NET="Schematic MLIN". В результате получим соединение двухпортовых цепей A, B, включённых навстречу друг другу. S-параметры $S_{ik}^{a,b}$, $i, k = 1, 2$, этого соединения позволяют определить S-параметры цепей A, B как

$$\begin{cases} S_{22}^a = S_{22}^b = (S_{11}^{ab} - S_{11}^a) / S_{21}^{ab}, \\ S_{21}^a S_{12}^a = S_{21}^b S_{12}^b = S_{21}^{ab} (1 - S_{22}^a S_{22}^b); \\ \det S^a = \det S^b = S_{11}^a S_{22}^a - S_{21}^a S_{12}^a, \end{cases}$$

где S_{11}^a – коэффициент отражения от микрополосковой линии в режиме идеального согласования второго порта.

Процедуру экстракции цепей A, B из S-параметров трёхкаскадного соединения S_{ik}^{alb} выполняют по соотношениям [4]:

$$\begin{cases} S_{11}^{\text{air}} = [(\det S^{\text{alb}} - S_{11}^a S_{22}^{\text{alb}}) S_{22}^b - (S_{11}^{\text{alb}} - S_{11}^a) \det S^b] Z^{-1}, \\ S_{21}^{\text{air}} = S_{21}^{\text{alb}} S_{12}^a S_{21}^b Z^{-1}, \\ Z = S_{22}^a (S_{22}^b \det S^{\text{alb}} - S_{11}^{\text{alb}} \det S^b) + (\det S^b - S_{22}^{\text{alb}} S_{22}^b) \det S^a, \\ \det S^{\text{alb}} = S_{11}^{\text{alb}} S_{22}^{\text{alb}} - S_{21}^{\text{alb}} S_{12}^{\text{alb}}. \end{cases}$$

Запишем частотную зависимость комплексного волнового сопротивления в виде

$$\dot{Z}_B(f) = \frac{50}{r(f)} \frac{1 + S_{11}(f)}{1 - S_{11}(f)},$$

где коэффициент отражения $S_{11}(f)$ определён с помощью схемной модели электрически длинной полосковой линии с воздушным диэлектриком.

В схемной модели необходимо установить длину электрически длинной линии с воздушным диэлектриком настолько большой (например 100 м), чтобы отражение электромагнитной волны от второго порта имело исчезающее малое значение. Волновое сопротивление $Z \approx 50$ Ом портов следует выбрать таким, чтобы график частотной зависимости $\dot{Z}_B(f)$ максимально приближался к полученным LTR-методом оценочным значениям волнового сопротивления

(см. рис 2). Существенно, что найденную частотную зависимость можно представить аналитическим выражением [1]:

$$Z_B(f) = Z_B(f_0) \left\{ q(f) - [q(f) - 1] \frac{\varepsilon_r(f_0) - \varepsilon_{эфф}(f)}{\varepsilon_r(f_0) - \varepsilon_{эфф}(f_0)} \right\},$$

где $Z_B(f_0) = 46,62 \text{ Ом}$; $\varepsilon_r(f_0) = 3,39$; $\varepsilon_{эфф}(f_0) = 2,85$;
 $q(f) = 1,067 + 0,0011f/f_k$, $f_k = 26,5 \text{ ГГц}$.

Известное значение $Z_B(f)$ позволяет представить результаты измерений S-параметров электронных компонентов в микрополосковых линиях передачи для удобства пользователей в формате touchstone-файлов в виртуальном полосковом канале с волновым сопротивлением 50 Ом.

Идентификация параметров схемных моделей чип-резисторов. Актуальность измерения волнового сопротивления микрополосковой линии подтверждена на примере идентификации параметров схемных моделей чип-резисторов трёх номиналов 50; 100; 270 Ом. S-параметры измерены относительно физических границ объектов в оснастке, показанной на рис. 4. Резистор установлен между центральным полосковым проводником и экраном. При таком подключении контактные площадки отсутствуют, и можно определить собственные параметры контролируемого объекта. Экстракция коаксиально-полосковых переходов и отрезков полосковых линий выполнена LTR-методом.

Коэффициенты передачи S_{21} , S_{12} инвариантны к положению объектов в оснастке. Влияние погрешности позиционирования на коэффициенты отражения S_{11} , S_{22} устранено заменой этих параметров их полусуммой. Схемная модель резистора показана на рис. 5. Собственные параметры схемных моделей контролируемых объектов определены в двух вариантах: В1 – с вероятным (стандартным) значением 50 Ом и В2 – с фактическим значением $Z_B(f)$ волнового сопротивления полосковой линии. Собственные параметры чип-резисторов идентифицированы в системе автоматизированного проектирования AWR путём минимизации целевой функции симплекс-методом. Результаты приведены в табл. 1 в виде дробей «В1/В2»; $R_{ном}$ – номинальное сопротивление резистора.

Согласно табл. 1 оценки сопротивлений R для резисторов трёх номиналов с использованием фактических значений волнового сопротивления полосковой линии оказались более близкими к ожидаемым значениям, чем в случае стандартного волнового сопротивления 50 Ом.

Альтернативным способом определения собственных параметров резисторов является использование виртуальных S-параметров в формате touchstone-файлов, трансформированных к стандартному значению волнового сопротивления 50 Ом. Процедура преобразования измеренных параметров к виртуальным известна и основана на S-параметрах скачка волнового сопротивления $r = \dot{Z}_B/50$ [6]. Результаты идентификации собственных параметров чип-резисторов с применением виртуальных S-параметров достаточно близки к результатам, полученным с помощью фактического значения волнового сопротивления.

Остаётся исследовать, являются ли полученные рассмотренными способами собственные параметры электронных компонентов инвариантными по отношению к полосковым линиям с разной геометрией поперечного сечения и разными материалами изоляционного основания. С этой целью для проведения экспериментальных исследований выбраны материалы изоляционного основания полосковых линий разной толщины, из которых изготовили экранированные полосковые линии номиналом 50 Ом. Параметры материалов

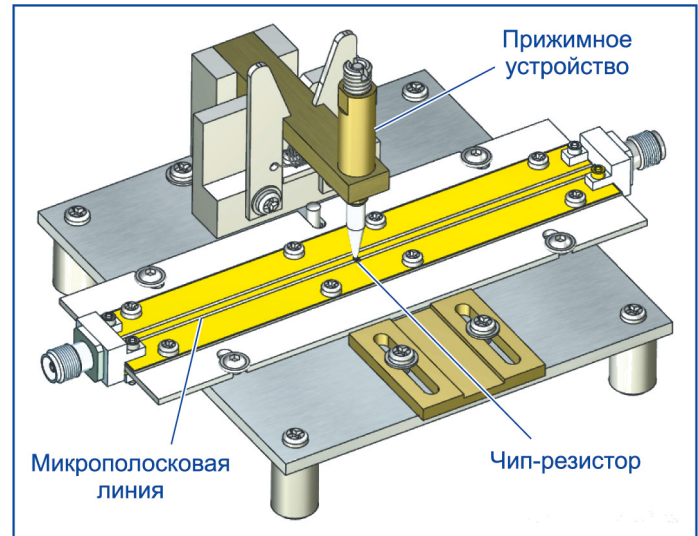


Рис. 4. Оснастка для измерения S-параметров электронных компонентов

Fig. 4. Equipment for measuring S-parameters of electronic components

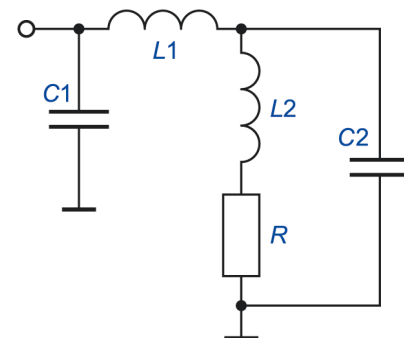


Рис. 5. Схемная модель резистора

Fig. 5. Resistor circuit model

Таблица 1

Параметры схемной модели чип-резисторов
при различном волновом сопротивлении полосковой линии

$R_{ном}, \text{Ом}$	$R, \text{Ом}$	$C_1, \text{пФ}$	$C_2, \text{пФ}$	$L_1, \text{нГн}$	$L_2, \text{нГн}$
50	55,27/51,38	-0,013/-0,021	0,03/0,04	-0,27/-0,20	0,61/0,52
100	107,75/100,16	-0,066/-0,067	0,036/0,041	-0,009/-0,025	-0,45/-0,30
270	286,07/265,92	-0,014/-0,013	0,022/0,022	-0,216/-0,214	0,89/0,83

Таблица 2

Параметры полосковых линий с изоляционным основанием
из различных материалов

Материал	N	H , мм	W , мм	T , мм	ε	$\text{tg}\delta$	$f_{\text{гр}}$, ГГц
RO4003C	1	0,813	1,84	0,035	3,38	0,0027	5
	2	1,524	3,50	0,018			
AD255C	3	2,032	5,64	0,035	2,55	0,0018	1

и геометрические размеры линий передачи приведены в табл. 2, где H – толщина изоляционного основания; W , T – соответственно ширина и толщина полоскового проводника; $f_{\text{гр}}$ – верхняя граница частоты; N – вариант линии передачи.

Собственные параметры схемных моделей контролируемого резистора P1-8B определены в диапазоне частот 0,01–1 ГГц. Верхняя граница частотного диапазона 1 ГГц обусловлена граничной частотой третьего варианта линии передачи. Результаты восстановления искомых параметров для резистора P1-8B номинальным сопротивлением 50 Ом получены минимизацией целевой функции симплекс-методом и представлены в табл. 3 в виде дробей, аналогичных приведённым в табл. 1.

Полученные результаты показывают достаточно большой разброс оценок реактивных элементов схемных моделей одного и того же объекта, контролируемого в полосковых линиях с разными материалами изоляционного основания и разной геометрией поперечного сечения. Такой результат объясняется, как и предполагалось, уникальным взаимодействием объекта с конкретной линией передачи, в которую он установлен. По этой причине проектирование микроволновых интегральных устройств на схемном уровне не всегда даёт удовлетворительные результаты, и приходится доводить решения с помощью 3D-моделей, требующих больших вычислительных и временных затрат.

Заключение. Предлагаемый способ измерения волнового сопротивления микрополосковой линии векторным анализатором цепей повышает степень достоверности получаемой информации об электромагнитных параметрах электронных компонентов. По сравнению с зондовыми станциями такое решение представляется более корректным, поскольку воспроизводит близкие к реальным условия диагностики объектов. Тем не менее обсуждаемая задача всё ещё далека от окончательного решения ввиду уникального взаимодействия электронных компонентов с реальной линией передачи, в которой они используются. Даже если удастся исключить влияние окружающих цепей, коаксиально-полосковых переходов, отрезков линий и контактных площадок, схемные модели электронных компонентов в определённой степени несвободны от той линии, в которой проводились испытания. Особенно чувствительны к используемой линии реактивные параметры индуктивности и ёмкости.

Таблица 3

Параметры схемной модели резистора P1-8B

N	R , Ом	C_1 , пФ	C_2 , пФ	L_1 , нГн	L_2 , нГн
1	54,030/52,204	1,462/1,590	0,410/0,373	0/0	4,388/4,130
2	54,090/51,002	1,809/1,923	0/0	0,696/0,664	4,845/3,659
3	55,120/51,755	1,522/1,597	0/0	0,507/0,344	4,143/4,127

Список источников

1. Лупанова Е. А., Никулин С. М. Метод определения собственных параметров полосковых линий передачи // Измерительная техника. 2021. № 5. С. 47–52. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-5-47-52>
2. Дансмор Д. П. Настольная книга инженера. Измерение параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей: Пер. с англ. М.: Техносфера, 2018. 736 с.
3. Das N. K., Voda S. M., Pozar D. M., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1987, vol. 35, no. 7, pp. 636–642. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1987.1133722>
4. Akima H., *Journal of the Association for Computing Machinery*, 1970, vol. 17, no. 4, pp. 589–602. <https://doi.org/10.1145/321607.321609>
5. Wadell B. C., *Transmission line design hand book*, Arctech House, Inc, 1991, 513 p. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1987.1133722>
6. Евсеев В. И., Никулин С. М. LR и экспресс-метод контроля параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2020. Т. 1. С. 18–22.

References

1. Lupanova E. A., Nikulin S. M., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 5, pp. 398–404. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01945-x>
2. Joel P. Dunsmore, *Handbook of Microwave Component Measurements: With Advanced VNA Techniques*, John Wiley and Sons Limited, 2012, 640p. <https://doi.org/10.1002/9781118391242>
3. Das N. K., Voda S. M., Pozar D. M., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1987, vol. 35, no. 7, pp. 636–642. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1987.1133722>
4. Akima H., *Journal of the Association for Computing Machinery*, 1970, vol. 17, no. 4, pp. 589–602. <https://doi.org/10.1145/321607.321609>
5. Wadell B. C., *Transmission line design hand book*, Arctech House, Inc, 1991, 513 p. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1987.1133722>
6. Evseev V. I., Nikulin S. M., LR i ekspress-metod kontrolya parametrov elektronnykh komponentov v poloskovykh liniyakh peredachi [LR and express method for monitoring the parameters of electronic components in strip transmission lines], *Elektronika i mikroelektronika SVCh [Microwave electronics and microelectronics]*, 2020, pp. 18–22 (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 28.03.2022; одобрена после рецензирования 19.04.2022; принята к публикации 20.04.2022.
The article was submitted 28.03.2022; approved after reviewing 19.04.2022; accepted for publication 20.04.2022.

Сравнение метрологических характеристик методов неразрушающего контроля коэффициента диффузии в тонких пористых материалах

Вадим Павлович Беляев^{1✉}, Максим Павлович Беляев², Сергей Владимирович Мищенко³, Павел Серафимович Беляев⁴

1, 2, 3, 4 Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

¹belvp8@rambler.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-5424-6693>

²belyaev_mp@mail.ru

³msv@mail.tstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1423-0002>

⁴bps800@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4277-8366>

Аннотация. Изучены проблемы недостаточной оперативности и точности методов неразрушающего контроля коэффициента диффузии в тонких пористых материалах. Производительность исследований коэффициента диффузии традиционными методами низка из-за необходимости длительной градуировки преобразователей концентрации диффузанта в пористом материале. Рассмотрены два метода, позволяющие определять коэффициент диффузии в отсутствие реальной статической характеристики применяемого преобразователя концентрации диффузанта. Метод I жёстко привязан к необходимости фиксирования момента времени, соответствовавшего максимуму концентрации диффузанта после нанесения импульсного воздействия. При определении искомого коэффициента методом II возможен выбор двух одинаковых значений выходной характеристики преобразователя после импульсного воздействия с фиксированием соответствующих им моментов времени. Проведено сравнение указанных методов. Исследованы погрешности определения искомого коэффициента в сопоставимых условиях двумя методами. Проанализирована возможность снижения результирующей погрешности метода II за счёт выбора величин, входящих в расчётное выражение. Результаты исследования будут полезны при производстве и эксплуатации изделий из пористых материалов.

Ключевые слова: методы неразрушающего контроля, пористый материал, коэффициент диффузии, импульсное воздействие, метрологические характеристики

Для цитирования: Беляев В. П., Беляев М. П., Мищенко С. В., Беляев П. С. Сравнение метрологических характеристик методов неразрушающего контроля коэффициента диффузии в тонких пористых материалах // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 69–75. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-69-75>

Comparison of metrological characteristics of diffusion coefficient non-destructive testing methods in thin porous materials

Vadim P. Belyaev^{1✉}, Maksim P. Belyaev², Sergey V. Mishchenko³, Pavel S. Belyaev⁴

1, 2, 3, 4 Tambov State Technical University, Tambov, Russia

¹belvp8@rambler.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-5424-6693>

²belyaev_mp@mail.ru

³msv@mail.tstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1423-0002>

⁴bps800@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4277-8366>

Abstract. The problem of insufficient efficiency and accuracy of diffusion coefficient non-destructive testing methods in thin porous materials is studied. The productivity of diffusion coefficient studies by traditional methods is low due to the need for long-term calibration of diffusant concentration converters in a porous materials. Two methods that make it possible to determine the desired coefficient in the absence of a real static characteristic for the applied diffusant concentration converter are considered. Method I is rigidly tied to fix the time moment, which corresponds to the maximum diffusant concentration after the application of the pulsed action. When determining the desired coefficient by method II, it is possible to select two identical values of the converter output characteristics after a pulse action with fixing the corresponding time points. The comparison of these methods is carried out. The errors of determining the desired coefficient under comparable conditions are investigated by two methods. The possibility of reducing the resulting error for method II by selecting the values included in the calculated expression is analyzed. The results of the study will be useful in the production and operation of products made from porous materials.

Keywords: methods of non-destructive testing, porous material, diffusion coefficient, pulse action, metrological characteristics

Введение. Изделия из пористых материалов применяются в различных областях деятельности человека: в строительстве, энергетике, космических исследованиях, производстве средств защиты в чрезвычайных ситуациях и др. [1, 2]. Диффузия влаги в пористых строительных изделиях во многом определяет микроклимат в помещении и эффективность теплозащитных свойств ограждающих конструкций. При создании средств защиты органов дыхания человека использование сорбентов и хемосорбентов в виде текстильных полотен, тонких листов или пластин позволяет существенно улучшить технические характеристики разрабатываемых аварийно-спасательных средств [3]. Для повышения эффективности процессов производства и эксплуатации изделий из пористых материалов требуется оперативное определение коэффициента диффузии, входящего в состав уравнений математических моделей процессов.

Развитие современных высокотехнологичных производств связано с получением новых пористых материалов и целенаправленным изменением их свойств путём модификации. При этом изменение состава и содержания компонентов модификаторов приводит к изменениям пористости и морфологии поверхности пористых материалов и, соответственно, коэффициентов диффузии.

В настоящее время при исследовании процессов тепло- и массопереноса часто используются методы, предусматривающие измерение пространственных распределений диффундирующих веществ [4]. Современная аппаратура позволяет проводить непрерывное измерение пространственных распределений диффундирующих веществ без нарушения структуры исследуемых образцов по поглощению различных видов излучений (рентгеновское, гамма-излучение, нейтронное), путём использования явлений ядерного магнитного резонанса, инфракрасной микроскопии и др. [4–9]. Однако сами методы не могут в полной мере считаться неразрушающими, так как коэффициент диффузии измеряется с использованием специально изготовленных образцов, а не готовых изделий. Массогабаритные параметры применяемой аппаратуры затрудняют её применение при реализации высокопроизводительных методов неразрушающего контроля коэффициента диффузии.

Перспективным направлением развития науки и техники является создание экспресс-методов неразрушающего контроля с использованием портативных измерительных средств. Например, производительность аппаратуры для определения характеристик теплопереноса (теплопроводности, теплоёмкости, коэффициента температуропроводности) повышается за счёт использования контактных импульсных методов неразрушающего контроля при обеспечении возможности одностороннего подхода к плоским участкам контролируемых изделий [10, 11]. Однако сложность измерения локальных значений концентрации диффундирующих в твёрдой фазе веществ по сравнению с измерением локальных температур [11, 12] предопределяет отставание импульсных методов неразрушающего контроля и измерительных средств исследования характеристик массопереноса. Проблема заключается не только в сложности обеспечения локальности измерения концентрации диффундирующих веществ в конкретных точках изделий, но и в необходимости

индивидуальной градуировки применяемых преобразователей по каждой новой системе пористый материал – диффузант [12]. Причём изменение структуры одного и того же пористого материала приводит к необходимости получения новой градуировочной характеристики применяемого преобразователя концентрации, что вызывает существенные затраты времени и средств и исключает оперативный контроль характеристик массопереноса.

Для неразрушающего контроля коэффициента диффузии в тонколистовых пористых материалах разработаны методы, базирующиеся на использовании мгновенных точечных источников [13–16]. Реализация методов, представленных в [13, 14], связана с необходимостью проведения длительных предварительных градуировок применяемых преобразователей концентрации диффузантов по каждому новому пористому материалу, поэтому производительность исследований снижена.

В [15, 16] представлены два метода с высокой оперативностью определения коэффициента диффузии, исключающие необходимость получения реальной статической характеристики применяемого преобразователя концентрации диффузанта.

Цель статьи – сравнение точности двух методов, обеспечивающих определение коэффициента диффузии без предварительной градуировки преобразователя концентрации диффузанта.

Методы определения коэффициента диффузии. Оба рассматриваемых в [15, 16] метода базируются на реализации в измерительной аппаратуре динамических процессов массопереноса после нанесения дозой полярного растворителя точечного импульсного воздействия на объект контроля. В качестве измерителя концентрации используется гальванический преобразователь, позволяющий обеспечить необходимую пространственную локализацию измерений [12].

При реализации указанных методов исследуемый образец из листового пористого материала с равномерным начальным распределением растворителя (в том числе и нулевым) помещали на плоскую подложку из непроницаемого для растворителя материала, например фторопласта. К поверхности образца прижимали зонд с импульсным точечным источником дозы растворителя и расположенными на концентрической окружности относительно точки импульсного воздействия на изделие электродами гальванического преобразователя. После подачи импульса источник растворителя удаляли из зонда, отверстие для размещения источника растворителя герметизировали заглушкой, а сам зонд обеспечивал гидроизоляцию поверхности образца в зоне действия источника и прилегавшей к ней области контроля распространения растворителя. После подачи импульса фиксировали изменение ЭДС гальванического преобразователя во времени в виде характерных кривых с восходящими участками до момента достижения максимума и нисходящими участками – после [15, 16].

Метод 1. При определении коэффициента диффузии методом I фиксировали момент времени $t_{\max}$ достижения максимума ЭДС гальванического преобразователя, который вследствие монотонности статической характеристики преобразователя совпадал с моментом времени, соответствовавшим максимуму $U_{\max}$ на кривой изменения концентрации

диффузанта на расстоянии r_0 от источника. Коэффициент диффузии рассчитывали по формуле [15]:

$$D = r_0^2 / (4\tau_{\max}). \quad (1)$$

Однако при использовании данного метода наблюдались существенные недостатки, связанные с необходимостью фиксирования максимума концентрации после импульсного воздействия. Во-первых, тратилось время на поиск требуемого значения вносимой при импульсном воздействии дозы растворителя, которая обеспечивала бы использование диапазона статической характеристики гальванического преобразователя со стабильным сигналом и высокой чувствительностью к изменению концентрации растворителя [15]. Во-вторых, отмечалась невысокая точность определения моментов достижения максимумов на участках кривых изменения электродвижущей силы (ЭДС) преобразователя, где производная ЭДС по времени близка к нулю и низка чувствительность измеряемого параметра к изменению времени.

Метод II. В [16] представлен метод II неразрушающего контроля коэффициента диффузии в тонких изделиях из пористых материалов. Выбирали два произвольных одинаковых значения сигналов гальванического датчика E_1^* , E_2^* соответственно на восходящей и нисходящей ветвях кривой изменения ЭДС во времени. Вследствие монотонности статической характеристики преобразователя им соответствовали одинаковые значения концентрации U_1^* , U_2^* . Коэффициент диффузии рассчитывали по формуле [16]:

$$D = r_0^2 (\tau_2 - \tau_1) / [4\tau_2 \tau_1 \ln(\tau_2 / \tau_1)], \quad (2)$$

где τ_1 , τ_2 – моменты времени, при которых достигались значения сигналов датчика E_1^* , E_2^* .

При использовании метода I эксперимент признавали неудачным, если наблюдаемое значение $U_{\max}$ находилось за пределами рабочего диапазона статической характеристики применяемого преобразователя. В отличие от метода I при использовании метода II имела возможность выбора значений ЭДС преобразователя E_1^* , E_2^* на кривой её изменения во времени из предпочтительного диапазона его статической характеристики со стабильным и помехозащищённым сигналом [16]. Поэтому метод II по сравнению с методом I обладал гибкостью, т. е. свободой выбора значений ЭДС, по которым определяли моменты времени, входившие в расчётное выражение для определения искомого коэффициента диффузии.

Опыт использования гальванического преобразователя для контроля локальных значений концентрации распределённых в твёрдой фазе растворителей показал, что максимальная чувствительность выходной характеристики преобразователя к изменению концентрации и стабильность его работы наблюдалась в диапазоне 0,7–0,9 изменения относительного значения ЭДС E/E_0 [12, 15, 16]. Здесь E_0 – сигнал преобразователя, соответствовавший переходу растворителя из области, связанной с твёрдой фазой исследуемого материала, в область свободного состояния (максимально возможная ЭДС преобразователя при температуре контроля). Поэтому

выбирать равные ЭДС для определения моментов времени τ_1 , τ_2 , входящих в расчётную формулу, целесообразно из указанного диапазона.

Сравним метрологические характеристики двух рассмотренных методов неразрушающего контроля, предназначенных для исследований коэффициента диффузии в тонких пористых материалах.

Метод I проанализирован в [17]. В соответствии с ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения», ГОСТ 8.736-2011 «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения» и с точки зрения традиционных подходов теории погрешностей измерений [18] относительную среднеквадратическую погрешность δD_1 определения искомого коэффициента диффузии при использовании метода I можно представить в виде следующей формулы:

$$\delta D_1 = \sqrt{4(\delta r_0)^2 + (\delta \tau_{\max})^2 + (\delta_m)^2}, \quad (3)$$

где $\delta r_0 = \Delta r_0 / r_0$ и $\delta \tau_{\max} = \Delta \tau_{\max} / \tau_{\max}$ – относительная погрешность определения соответственно координаты расчётного сечения r_0 и времени достижения максимума $\tau_{\max}$ на кривой изменения концентрации растворителя в расчётном сечении (Δr_0 , $\Delta \tau_{\max}$ – соответствующие абсолютные погрешности); δ_m – относительная суммарная методическая погрешность, обусловленная неполным соответствием используемой математической модели реальным физическим процессам, происходящим в измерительном устройстве в ходе эксперимента (фактически относительное среднее квадратическое отклонение неисключённой систематической погрешности по ГОСТ 8.736-2011).

В формуле (3) сумма первых двух членов под знаком квадратного корня представляет суммарную дисперсию входных величин расчётной формулы (1), рассчитанную с использованием коэффициентов чувствительности (частных производных уравнения измерений по входным величинам) входных величин согласно ГОСТ 34100.3-2017.

В [17] показано, что при абсолютной погрешности ΔU измерения $U_{\max}$ ошибочное определение максимума концентрации можно зафиксировать до или после достижения максимального значения с соответствующими значениями $\Delta \tau_{\max}^-$, $\Delta \tau_{\max}^+$ абсолютной погрешности определения $\tau_{\max}$. Указанные значения отличаются между собой из-за несимметричности кривой изменения концентрации относительно момента времени $\tau_{\max}$. Предложены аналитические выражения для расчёта зависимости относительных значений $\delta \tau_{\max}^- = \Delta \tau_{\max}^- / \tau_{\max}$, $\delta \tau_{\max}^+ = \Delta \tau_{\max}^+ / \tau_{\max}$ от приборной погрешности δ (в данном случае погрешности измерения ЭДС соответствующей аппаратурой) [17].

Оценка погрешности δr_0 подробно описана в [19]. Традиционно при измерениях характеристик теплопереноса эта погрешность рассматривали как инструментальную погрешность измерения координаты размещения датчиков для измерения температуры [18]. При этом пренебрегали размерами датчиков, расположенными внутри образцов, например

диаметрами проволочных термпар или термометров сопротивления, считая вносимые ими искажения в процесс теплопереноса несущественными вследствие их высокой теплопроводности [11, 18, 20]. Однако при исследовании явлений массопереноса толщина слоя материала, в котором изменение концентрации диффузанта влияет на выходную характеристику применяемых электрофизических преобразователей (кондуктометрических, диэлькометрических, индуктивных), соизмерима с расстоянием r_0 от электродов преобразователя до точки нанесения импульсного воздействия [15, 16, 19]. А в пределах этого слоя в процессе эксперимента концентрация диффузанта распределена неравномерно и непрерывно изменяется с течением времени. Поэтому если рассматривать δr_0 как инструментальную погрешность измерения координаты размещения датчиков, то оценки данной погрешности и погрешности результата окажутся занижены. Учитывая специфику применения гальванических преобразователей для измерения концентрации распределённых в твёрдой фазе диффузанта, в [19] предложено использовать более корректную по сравнению с [18, 20] оценку $\delta r_0 = \pm a/r_0$, где a – радиус электродов преобразователя. В этом случае инструментальной погрешностью измерения координаты размещения электродов можно пренебречь ввиду её малости по сравнению с a .

В обоих методах электроды гальванического преобразователя использовали в виде подпружиненных отрезков стальной проволоки диаметром 0,2 мм с нанесённым гальваническим способом покрытием цинка и меди [15]. При расстоянии от преобразователя до импульсного источника $r_0 = 4$ мм относительная погрешность δr_0 составила 2,5 % [15].

Практика применения [13–16] импульсных методов для определения коэффициента диффузии показала достаточность для δ_m ограничения сверху $\delta_m \leq 5\%$. При этом обязательно соблюдают соответствующие ограничения [15, 18, 20]: на максимально возможную толщину контролируемого материала; на минимальные размеры участка, прилегающего

к зоне импульсного воздействия и развития поля концентрации; на максимальную длительность нанесения импульсного воздействия; на максимальные размеры радиуса пятна, в пределах которого обеспечивается подача растворителя на поверхность исследуемого образца из дозатора [15, 18, 20].

ЭДС гальванического преобразователя измеряли с помощью многофункциональной платы сбора данных PCI-1202H фирмы ISP DAS (Тайвань) в комплекте с персональным компьютером. Относительная приборная погрешность δ измерения ЭДС не превышала 0,5 %.

Рассчитаем относительную погрешность измерения коэффициента диффузии δD_1 методом I. Определив $\delta \tau_{\max}$ как среднее значение $\delta \tau_{\max}^-$, $\delta \tau_{\max}^+$ при относительной погрешности измерения ЭДС $\delta = 0,5\%$ [17], получим из (3) погрешность $\delta D_1 \approx 12,3\%$.

Проанализируем метрологические характеристики метода II неразрушающего контроля [16] в сопоставимых условиях с методом I.

На рис. 1 представлена абсолютная погрешность определения моментов времени τ_1 , τ_2 при абсолютной погрешности измерения концентрации $\Delta U/2$. Выбранным одинаковым значениям ЭДС E_1^* , E_2^* соответствуют значения концентрации диффузанта $U_1^*(r_0, \tau_1)$, $U_2^*(r_0, \tau_2)$ на кривой её изменения на расстоянии r_0 от источника. Отклонения от τ_1 , τ_2 в меньшую сторону обозначены соответственно $\Delta \tau_1^-$, $\Delta \tau_2^-$, в большую сторону – соответственно $\Delta \tau_1^+$, $\Delta \tau_2^+$. Соответствующие относительные значения этих погрешностей обозначены следующим образом: $\delta \tau_1^- = \Delta \tau_1^- \tau_1^{-1}$ и $\delta \tau_1^+ = \Delta \tau_1^+ \tau_1^{-1}$; $\delta \tau_2^- = \Delta \tau_2^- \tau_2^{-1}$ и $\delta \tau_2^+ = \Delta \tau_2^+ \tau_2^{-1}$.

Введём новые переменные $y = (\tau_2 - \tau_1)$, $z = \ln(\tau_2/\tau_1)$. Расчётную формулу (2) метода II преобразуем к виду

$$D = r_0^2 y (4 \tau_2 \tau_1 z)^{-1}.$$

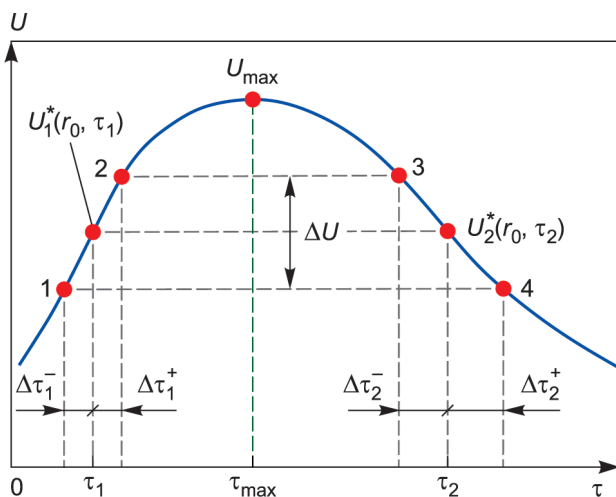


Рис. 1. Абсолютные значения $\Delta \tau_1$ и $\Delta \tau_2$ погрешности определения моментов времени τ_1 , τ_2

Fig. 1. Absolute values $\Delta \tau_1$ and $\Delta \tau_2$ for the errors in determining τ_1 and τ_2 time moments

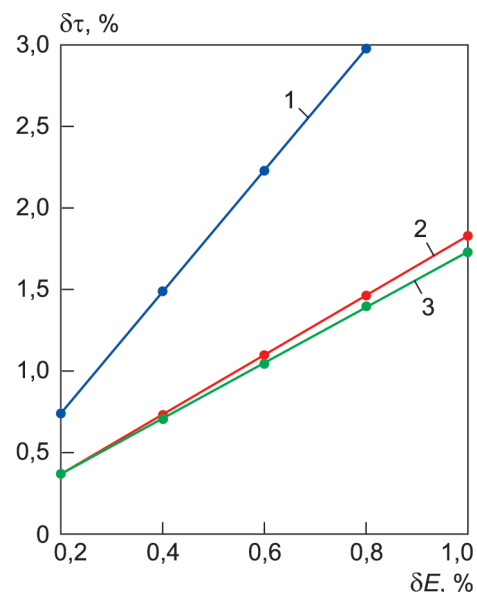


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности измерения моментов времени τ_1 , τ_2 от погрешности измерения ЭДС: 1 – $\delta \tau_2$; 2 – $\delta \tau_1^-$; 3 – $\delta \tau_1^+$

Fig. 2. The relative error dependence of measuring time moments τ_1 , τ_2 from the error of the EMF measurement: 1 – $\delta \tau_2$; 2 – $\delta \tau_1^-$; 3 – $\delta \tau_1^+$

Относительную среднеквадратическую погрешность определения искомого коэффициента диффузии δD_2 метода II, рассчитанную с учётом коэффициентов чувствительности входных величин согласно ГОСТ 34100.3-2017 и с учётом относительной суммарной методической погрешности δ_M , можно представить в виде следующей формулы:

$$\delta D_2 = \sqrt{4(\delta r_0)^2 + (\delta y)^2 + (\delta z)^2 + (\delta \tau_2)^2 + (\delta \tau_1)^2 + \delta_M^2}, \quad (4)$$

где $\delta \tau_1 = \Delta \tau_1 / \tau_1$, $\delta \tau_2 = \Delta \tau_2 / \tau_2$ – относительные погрешности определения моментов времени τ_1 , τ_2 соответственно; $\delta y = \Delta y / y$, $\delta z = \Delta z / z$ – относительные погрешности определения y , z соответственно.

Определим значения δy , δz , используя коэффициенты чувствительности входных величин:

$$\delta y = \delta(\tau_2 - \tau_1) = \sqrt{(\Delta \tau_2)^2 + (\Delta \tau_1)^2} / (\tau_2 - \tau_1); \quad (5)$$

$$\delta z = \delta \ln(\tau_2 / \tau_1) = \sqrt{(\delta \tau_2)^2 + (\delta \tau_1)^2} / \ln(\tau_2 / \tau_1). \quad (6)$$

Для сопоставления метрологических характеристик методов численно моделировали влияние погрешности измерения ЭДС гальванического преобразователя δE на погрешности $\delta \tau_1$, $\delta \tau_2$ для экспериментальных исследований, представленных в [16]. При этом использовали ранее полученную дополнительную информацию о статической характеристике гальванического преобразователя.

Электроды преобразователя располагали относительно точки нанесения импульса так же, как при методе I, т. е. $r_0 = 4$ мм. В связи с тем что исходные физическая и математическая модели обоих методов идентичны, а также аналогичны

изложенные выше ограничения, методическая погрешность в расчётах задавалась $\delta_M \leq 5\%$.

В связи с тем что метод II обеспечивает возможность определения искомого коэффициента диффузии при различных одинаковых значениях E_1^* , E_2^* из диапазона $(0,7-0,9)E_3$, исследуем влияния выбора указанных значений на оценку погрешности получаемых результатов. Обозначим $E_{\max} = E_{\max}^* / E_3$ относительное значение достигаемого максимума ЭДС преобразователя в момент времени $\tau_{\max}$; $E_p = E_p^* / E_3$ – относительное значение ЭДС преобразователя, при котором зафиксируем значения моментов времени τ_1 , τ_2 , входящих в расчётное выражение (2). Отметим, что достижение в эксперименте максимума $E_{\max} \geq 0,95$ приводит к увеличению длительности эксперимента, а при $E_{\max} \leq 0,75$ возрастает погрешность определения входящих в расчётное выражение (2) членов и результирующей погрешности определения искомого коэффициента диффузии.

На рис. 2 представлена зависимость $\delta \tau_1^-$, $\delta \tau_1^+$ от погрешности измерения ЭДС гальванического преобразователя δE (кривые 2 и 3 соответственно) при $E_{\max} = 0,95$, $E_p = 0,8$. Зависимости $\delta \tau_2^-$, $\delta \tau_2^+$ от погрешности δE практически укладываются на одну кривую (рис. 2, кривая 1). Для сопоставления с методом I все дальнейшие расчёты проводили для относительной погрешности измерения ЭДС преобразователя $\delta E = 0,5\%$.

Численные эксперименты выполняли для различных сочетаний $E_p \in (0,7-0,9)$, $E_{\max} \in (0,75-0,95)$ с шагом 0,05. При этом получали зависимости $\delta \tau_1^-$, $\delta \tau_1^+$, $\delta \tau_2^-$, $\delta \tau_2^+$ от погрешности δE по типу рис. 2. В таблице представлены результаты расчётов оценок погрешностей $\delta \tau_1$, $\delta \tau_2$ для различных сочетаний E_p , $E_{\max}$. Погрешности $\delta \tau_1$, $\delta \tau_2$ рассчитывали как средние арифметические значения соответственно $\delta \tau_1^-$, $\delta \tau_1^+$ и $\delta \tau_2^-$, $\delta \tau_2^+$.

Проведённые исследования показали закономерное уменьшение погрешностей $\delta \tau_1$, $\delta \tau_2$ при увеличении разности $(E_{\max} - E_p)$. Чем ближе значение E_p к $E_{\max}$, тем более

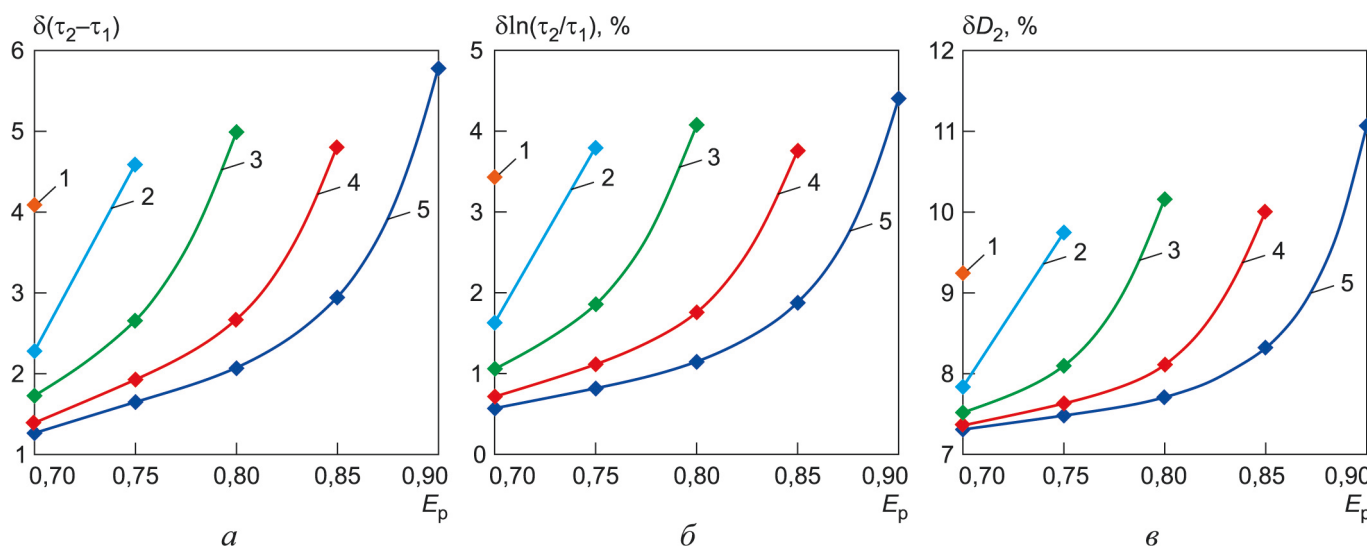


Рис. 3. Зависимости относительных погрешностей $\delta(\tau_2 - \tau_1)$ (а), $\delta \ln(\tau_2 / \tau_1)$ (б) и результирующей относительной погрешности δD_2 (в) определения искомого коэффициента диффузии от выбранных значений E_p при различных уровнях $E_{\max}$: 1 – 0,75; 2 – 0,80; 3 – 0,85; 4 – 0,90; 5 – 0,95

Fig. 3. The relative errors dependence of determination $\delta(\tau_2 - \tau_1)$ (a), $\delta \ln(\tau_2 / \tau_1)$ (b), resulting relative error δD_2 in determining the desired diffusion coefficient (c) from the selected values E_{cal} at different levels $E_{\max}$: 1 – 0,75; 2 – 0,80; 3 – 0,85; 4 – 0,90; 5 – 0,95

Оценки погрешностей $\delta\tau_1$, $\delta\tau_2$ при $E_{\max}=0,75...0,95$

E_p	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75
Погрешность $\delta\tau_1$					
0,70	0,47	0,56	0,73	0,96	1,53
0,75	0,65	0,8	1,13	1,75	–
0,80	0,87	1,13	1,90	–	–
0,85	1,27	1,98	–	–	–
0,90	2,39	–	–	–	–
Погрешность $\delta\tau_2$					
0,70	1,16	1,22	1,39	1,62	2,18
0,75	1,48	1,62	1,93	2,54	–
0,80	1,77	2,05	2,83	–	–
0,85	2,33	3,00	–	–	–
0,90	3,75	–	–	–	–

пологими становились кривые изменения ЭДС во времени и тем ниже чувствительность к изменению времени (особенно при $E_p=0,90$, $E_{\max}=0,95$).

Полученные данные позволили проанализировать эволюцию оценок $\delta(\tau_2-\tau_1)$, $\delta\ln(\tau_2/\tau_1)$, входящих в формулу (4), а также изменения результирующей погрешности δD_2 искомого коэффициента при использовании метода II.

На рис. 3 представлены рассчитанные по формулам (5), (6) зависимости $\delta(\tau_2-\tau_1)$, $\delta\ln(\tau_2/\tau_1)$, а также рассчитанные согласно (4) зависимости результирующей погрешности δD_2 от выбранных значений E_p при различных уровнях $E_{\max}$.

Сравнительный анализ результатов расчёта коэффициентов диффузии двумя методами. Проведённый метрологический анализ двух методов в сопоставимых условиях показал, что метод II во всём диапазоне изменения выбираемых расчётных значений E_p при всех рассматриваемых уровнях достигаемых относительных значений максимума ЭДС гальванического преобразователя $E_{\max}$ характеризуется меньшими значениями относительной среднеквадратической погрешности определения искомого коэффициента диффузии по сравнению с методом I. Для снижения погрешности целесообразно при постановке экспериментальных исследований обеспечивать возможно большое значение разности ($E_{\max}-E_p$) путём изменения количества диффузанта, вносимого при импульсном воздействии [15]. А искомый коэффициент необходимо рассчитывать при минимально возможных значениях E_p . Тогда при всех значениях $E_{\max}$ кроме $E_{\max}=0,75$ возможно снижение погрешности более чем в полтора раза по сравнению с методом I при соответствующем выборе расчётного значения E_p (см. рис. 3, в).

Заключение. Проанализированы методы определения коэффициента диффузии: метод I, основанный на фиксации максимума ЭДС преобразователя, и метод II, основанный на фиксировании моментов времени, при которых достигаются два произвольно выбранных одинаковых значения выходной характеристики преобразователя после нанесения импульсного воздействия. Результаты сравнения двух методов показали, что погрешность определения коэффициента

диффузии методом II ниже, чем методом I. Поэтому исследование диффузии методом II даст более точный результат, в том числе за счёт возможности выбора значения ЭДС преобразователя, при котором фиксируются значения моментов времени, входящих в расчётное выражение для определения искомого коэффициента диффузии.

Список источников

1. Каблов Е. Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334. <https://doi.org/10.31857/S0869587320040052>
2. Гаршин А. П., Кулик В. И., Матвеев С. А., Нилов А. С. Современные технологии получения волокнисто-армированных композиционных материалов с керамической огнеупорной матрицей // Новые огнеупоры. 2017. № 4. С. 20–35. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-4-20-35>
3. Гладышева Т. В., Гладышев Н. Ф., Дворецкий С. И. Получение и свойства известкового хемосорбента с фторполимерной дисперсией // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. № 7. С. 955–958.
4. Delgado J. M. P. Q., Ramos N. M. M., de Freitas V. P., Journal of Building Physics, 2012, vol. 35, no. 3, pp. 251–266. <https://doi.org/10.1177/1744259111418331>
5. Hallaji M., Seppänen A., Pour-Ghaz M., Cement and Concrete Research, 2015, vol. 69, pp. 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.11.007>
6. Nizovtsev M. I., Stankus S. V., Sterlyagov A. N., Terekhov V. I., Khairulin R. A., Int. J. Heat Mass Transfer, 2008, vol. 51, no. 17, pp. 4161–4167. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2008.01.013>
7. Modern Drying Technology, vol. 2, Experimental Techniques, Ed. Mujumdar A. S., Tsotsas E., Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA, 2009, 374 p.
8. Hibbe F., Caro J., Chmelik C., Huang A., Kirchner T., Ruthven D., Valiullin R., Kärger J., Journal of the American Chemical Society, 2012, vol. 134, no. 18, pp. 7725–7732. <https://doi.org/10.1021/ja211492b>
9. Котерева Т. В., Иконников В. Б., Гавришук Е. М., Потапов А. М., Савин Д. В. Применение ИК микроскопии для прецизионного контроля диффузионных профилей распределения примесей железа и хрома в халькогенидах цинка // Журнал технической физики, 2018, т. 88, № 7. С. 1110–1115. <https://doi.org/10.21883/JTF.2018.07.46189.2572>
10. Selivanova Z. M., Kurenkov D. S., Varepo L. G., Trapeznikova O. V., Journal of Physics: Conference Series, 2021, vol. 1791, 012110. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1791/1/012110>
11. Платунов Е. С., Баранов И. В., Буравой С. Е., Курепин В. В. Теплофизические измерения / Под ред. Е. С. Платунова. СПб.: СПбГУНиПТ, 2010. 738 с.
12. Mishchenko S. V., Belyaev P. S., Gladkikh V. A., Safronova E. N., Drying Technology, 1999, vol. 17, no. 10, pp. 2151–2167. <https://doi.org/10.1080/07373939908917677>
13. Мочалин С. Н., Исаева И. Н., Пономарев С. В. Выбор оптимальных условий измерения характеристик влагопереноса в тонколистных капиллярно-пористых материалах методом

«мгновенного» источника влаги // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2010. Т. 16. № 3. С. 533–545.

14. Мочалин С. Н., Пономарев С. В. Измерение характеристик влагопереноса тонколистовых капиллярно-пористых материалов методом «мгновенного» источника влаги. М.: Издательство «Спектр», 2010. 100 с.

15. Беляев В. П., Мищенко С. В., Беляев П. С. Выбор оптимальных параметров режима измерений коэффициента диффузии растворителей при неразрушающем контроле изделий из капиллярно-пористых материалов // Измерительная техника. 2015. № 5. С. 68–71.

16. Беляев В. П., Мищенко С. В., Беляев П. С. Исследование коэффициента диффузии в тонких изделиях из пористых материалов // Журнал технической физики, 2019, т. 89, № 10. С. 1630–1634. <https://doi.org/10.21883/JTF.2019.10.48184.420-18>

17. Belyaev V. P., Varepo L. G., Belyaev P. S., Belousov O. A., Pudovkin A. P., *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2141, iss. 1, 050017. <https://doi.org/10.1063/1.5122160>

18. Пономарев С. В., Мищенко С. В., Дивин А. Г., Вертоградский В. А., Чуриков А. А. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / Под ред. С. В. Пономарева. М.: Физматлит, 2008. 408 с.

19. Беляев В. П., Беляев М. П., Мищенко С. В., Беляев П. С. Проектирование измерительного устройства для определения коэффициента диффузии растворителей в тонких изделиях из капиллярно-пористых материалов // Измерительная техника. 2013. № 10. С. 65–69.

20. Шашков А. Г., Волохов Г. М., Абраменко Т. Н., Козлов В. П. Методы определения теплопроводности и температуропроводности. М.: Энергия, 1973. 336 с.

References

1. Kablov E. N., *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228. <https://doi.org/10.1134/S1019331620020124>

2. Garshin A. P., Kulik V. I., Matveev S. A., Nilov A. S., *Refractories and Industrial Ceramics*, 2017, vol. 58, no. 2, pp. 148–161. <https://doi.org/10.1007/s11148-017-0073-4>

3. Gladysheva T. V., Gladyshev N. F., Dvoretiskii S. I., *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2016, vol. 89, no. 7, pp. 1206–1209. <https://doi.org/10.1134/S1070427216070223>

4. Delgado J. M. P. Q., Ramos N. M. M., de Freitas V. P., *Journal of Building Physics*, 2012, vol. 35, no. 3, pp. 251–266. <https://doi.org/10.1177/1744259111418331>

5. Hallaji M., Seppänen A., Pour-Ghaz M., *Cement and Concrete Research*, 2015, vol. 69, pp. 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.11.007>

6. Nizovtsev M. I., Stankus S. V., Sterlyagov A. N., Terekhov V. I., Khairulin R. A., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2008, vol. 51, no. 17, pp. 4161–4167. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2008.01.013>

7. *Modern Drying Technology*, vol. 2, *Experimental Techniques*, Ed. Mujumdar A. S., Tsotsas E., Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA, 2009, 374 p.

8. Hibbe F., Caro J., Chmelik C., Huang A., Kirchner T., Ruthven D., Valiullin R., Kärger J., *Journal of the American Chemical Society*, 2012, vol. 134, no. 18, pp. 7725–7732. <https://doi.org/10.1021/ja211492b>

9. Kotereva T. V., Ikonnikov V. B., Gavrishchuk E. M., Potapov A. M., Savin D. V., *Technical Physics*, 2018, vol. 63, no. 7, pp. 1079–1083. <https://doi.org/10.1134/S1063784218070204>

10. Selivanova Z. M., Kurenkov D. S., Varepo L. G., Trapeznikova O. V., *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1791, 012110. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1791/1/012110>

11. Platonov E. S., Baranov I. V., Buravoi S. E., Kurepin V. V., *Teplofizicheskie izmereniya [Thermophysical measurements]*, Ed. Platonov E. S., St. Petersburg, SPbGUNIPT Publ., 2010, 738 p. (In Russ.)

12. Mishchenko S. V., Belyaev P. S., Gladkikh V. A., Safronova E. N., *Drying Technology*, 1999, vol. 17, no. 10, pp. 2151–2167. <https://doi.org/10.1080/07373939908917677>

13. Mochalin S. N., Isaeva I. N., Ponomarev S. V., The Choice of Optimal Measuring Conditions of Moisture Transfer in Thin Sheet Capillary Porous Materials by the Technique of “Prompt” Moisture Source, *Transaction of the TSTU*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 533–545 (In Russ.).

14. Mochalin S. N., Ponomarev S. V., *Izmerenie harakteristik vlagoperenosa tonkolistovykh kapilljarno-poristykh materialov metodom “mgnovennogo” istochnika vlagi [Measurement of moisture transfer characteristics of thin-sheet capillary-porous materials by the method of “instantaneous” source of moisture]*, Moscow, Spektr Publ., 2010, 100 p. (In Russ.)

15. Belyaev V. P., Mishchenko S. V., Belyaev P. S., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 5, pp. 574–579. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0756-5>

16. Belyaev V. P., Mishchenko S. V., Belyaev P. S., *Technical Physics*, 2019, vol. 64, no. 10, pp. 1544–1547. <https://doi.org/10.1134/S1063784219100050>

17. Belyaev V. P., Varepo L. G., Belyaev P. S., Belousov O. A., Pudovkin A. P., *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2141, iss. 1, 050017. <https://doi.org/10.1063/1.5122160>

18. Ponomarev S. V., Mishchenko S. V., Divin A. G., Vertogradskii V. A., Churikov A. A., *Teoreticheskie i prakticheskie osnovy teplofizicheskikh izmerenii [Theoretical and practical foundations of thermophysical measurements]*, Ed. Ponomarev S. V., Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 408 p. (In Russ.)

19. Belyaev V. P., Belyaev M. P., Mishchenko S. V., Belyaev P. S., *Measurement Techniques*, 2014, vol. 56, no. 10, pp. 1190–1196. <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0353-z>

20. Shashkov A. G., Volohov G. M., Abramenko T. N., Kozlov V. P., *Metody opredeleniya teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti [Methods for determining thermal conductivity and thermal diffusivity]*, Moscow, Jenergiya Publ., 1973, 336 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 31.01.2022; одобрена после рецензирования 05.04.2022; принята к публикации 08.04.2022.
The article was submitted 31.01.2022; approved after 05.04.2022; accepted for publication 08.04.2022.

ПОДПИСКА – 2022

- на ежемесячный научно-технический журнал
«Измерительная техника»
(печатное издание и электронная копия)

- ▶ онлайн на сайтах подписных агентств
- ▶ в редакции

Подписка через Интернет

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