



**ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА
2022
№10**



Всемирный
день метрологии

РСТ
ВНИИМС

Метрология в эпоху цифровизации



Bureau
International des
Poids et
Mesures



20 Мая 2022
www.worldmetrologyday.org

© BIPM-OIML 2022

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2022 № 10 октябрь

Ежемесячный
научно-технический
журнал

Основан в 1939 г.

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

УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

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

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

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

ФГБУ «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической
службы»

МОО «Метрологическая академия»

СОДЕРЖАНИЕ

■ ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЭТАЛОНЫ

М. А. Винге, С. А. Морозов. Государственный первичный эталон единиц относительной влажности газов, молярной (объёмной) доли влаги, температуры точки росы/иней, температуры конденсации углеводородов ГЭТ 151-2020 3

■ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ

С. Ф. Левин. Шкала космологических расстояний. Часть 13: галактическая полярная анизотропия красного смещения квазаров и сверхновых типа SN Ia 11

■ ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

А. С. Волосников. Измерительная система на основе нерекурсивных фильтров с оптимальной коррекцией погрешности динамического измерения 19

■ ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Г. Н. Вишняков, В. Л. Минаев, С. С. Бочкарева. Эталонная установка для воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения единицы показателя преломления твёрдых веществ 26

Г. П. Арумов, А. В. Бухарин. Выбор оптимальных трасс для дистанционных измерений микроструктуры рассеивающего объекта 31

■ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Ю. Л. Николаев, А. А. Саморуков, А. А. Борисенко. Расчётные и экспериментальные методы оценки характеристик чувствительности виброиндукционного преобразователя 37

■ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

И. В. Бойков, А. А. Пивкина. Восстановление сигналов по амплитуде спектра 44

■ АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Б. И. Хатамтаев, Н. Г. Щерблюк. Экспериментальное определение акустического центра измерительного гидрофона 53

В. В. Савченко. Совершенствование методики измерения показателя точности авторегрессионной модели речевого сигнала 58

■ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

А. И. Крылов, А. Г. Будко, А. Ю. Михеева, И. Ю. Ткаченко, Г. Р. Нежиловский. Референтная методика измерений содержания фталатов в полимерных матрицах: аналитические и метрологические подходы 64



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Izmeritel'naya Tekhnika

Главный редактор
В. Н. Крутиков

Редакционная коллегия:

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

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

Сдано в набор: 23.09.2022.
Подписано в печать: 28.10.2022.
Формат 60х90 1/8. Бумага мелованная. Печать офсетная.
Усл. п.л. 9,0. Уч.-изд. л. 11,5. Тир. 200 экз. Зак. 22-03м.
Свободная цена.
Отпечатано в ООО «Типография «Миттель Пресс»,
127254, Москва, ул. Руставели, 14, с. 6, оф. 7.

Издание зарегистрировано Роскомнадзором
Свидетельство о регистрации: ПИ № ФС77-21572
от 15.07.2005.
Издатель: ФГБУ «ВНИИМС».
Адрес редакции и издателя: 119361, Москва,
ул. Озёрная, 46, ФГБУ «ВНИИМС».
Тел.: +7(495)781-48-70
E-mail: izmt@vniims.ru
Сайт: www.izmt.ru

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

CONTENTS

■ STATE STANDARDS

M. A. Vinge, S. A. Morozov. State primary standard of relative humidity of gases, molar (volume) fraction of moisture, dew / frost point temperature, hydrocarbon condensation temperature units GET 151-2020..... 3

■ FUNDAMENTAL PROBLEMS OF METROLOGY

S. F. Levin. Cosmological distances scale. Part 13: galactic polar redshift anisotropy of quasars and supernovae of type SN Ia 11

■ GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

A. S. Volosnikov. Measuring system on a basis of non-recursive filters with optimal dynamic error correction..... 19

■ OPTICOPHYSICAL MEASUREMENTS

G. N. Vishnyakov, V. L. Minaev, S. S. Bochkareva. Reference system for observation, storing and transmitting a two-dimensional spatial distribution (profile) of solids refractive index unit 26

G. P. Arumov, A. V. Bukharin. Selection of the optimal traces for remote measurements of the microstructure of a scattering object produced from particle images 31

■ ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

Yu. L. Nikolaev, A. A. Samorukov, A. A. Borisenko. Determination and evaluation of sensitivity characteristics a vibration induction transducer for magnetic flaw detection.... 37

■ RADIO MEASUREMENTS

I. V. Boikov, A. A. Pivkina. Signals recovery by the amplitude of its spectrum 44

■ ACOUSTIC MEASUREMENTS

B. I. Khatamtaev, N. G. Shcherblyuk. Experimental determination of the acoustic center of a measuring hydrophone 53

V. V. Savchenko. Improving the method for measuring the accuracy indicator of the speech signal autoregressive model..... 58

■ PHYSICOCHEMICAL MEASUREMENTS

A. I. Krylov, A. G. Budko, A. Y. Mikheeva, I. Y. Tkachenko, G. R. Nezhikhovskiy . Reference method for measuring the content of phthalates in polymer matrices: analytical and metrological approaches 64

Государственный первичный эталон единиц относительной влажности газов, молярной (объёмной) доли влаги, температуры точки росы/иней, температуры конденсации углеводородов ГЭТ 151-2020

Михаил Александрович Винге¹, Сергей Александрович Морозов²✉

^{1, 2} Восточно-Сибирский филиал ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Иркутск, Россия

¹vinge@vniiftri-irk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7762-0249>

²morozov@vniiftri-irk.ru ✉

Аннотация. Описаны способы расширения номенклатуры и диапазонов воспроизводимых величин, а также улучшения функциональных возможностей Государственного первичного эталона единиц относительной влажности газов, молярной (объёмной) доли влаги, температуры точки росы/иней ГЭТ 151-2014. В результате проведённых исследований разработан и утверждён Государственный первичный эталон единиц относительной влажности газов, молярной (объёмной) доли влаги, температуры точки росы/иней, температуры конденсации углеводородов ГЭТ 151-2020, в состав которого введён комплекс эталонных генераторов, воспроизводящих температуру точки росы/иней и температуру конденсации углеводородов при высоких давлениях рабочего газа. Представлено описание ГЭТ 151-2020 и входящего в его состав комплекса эталонных генераторов, реализующих воспроизведение единиц температуры точки росы/иней и температуры конденсации углеводородов с учётом влияющих факторов по давлению рабочего газа. Исследованы метрологические характеристики ГЭТ 151-2020. Составлен бюджет неопределённости измерений при воспроизведении температуры точки росы/иней и температуры конденсации углеводородов. Разработана и утверждена Государственная поверочная схема для средств измерений влажности газов и температуры конденсации углеводородов. Решены актуальные вопросы обеспечения единства измерений в области гирометрии. Реализованы задачи метрологического обеспечения средств измерений температуры точки росы и температуры конденсации углеводородных газов при высоких давлениях рабочего газа. Полученные результаты применимы при создании экспериментальной базы для исследований физических свойств технических и природных газов и утверждении государственных справочных данных в широком диапазоне давлений и температур рабочего газа.

Ключевые слова: первичный эталон, влажность газов, относительная влажность, молярная доля, температура точки росы/иней, температура конденсации углеводородов, метод двух давлений, метод фазового равновесия, государственная поверочная схема

Для цитирования: Винге М. А., Морозов С. А. Государственный первичный эталон единиц относительной влажности газов, молярной (объёмной) доли влаги, температуры точки росы/иней, температуры конденсации углеводородов ГЭТ 151-2020 // Измерительная техника. 2022. № 10. С. 3–10. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-3-10>

State primary standard of relative humidity of gases, molar (volume) fraction of moisture, dew / frost point temperature, hydrocarbon condensation temperature units GET 151-2020

Mihail A. Vinge¹, Sergey A. Morozov²✉

^{1, 2} East-Siberian Branch of FSUE "Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering", Irkutsk, Russia

¹vinge@vniiftri-irk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7762-0249>

²morozov@vniiftri-irk.ru ✉

Abstract. The State primary standard of relative humidity, molar (volume) fraction of water, dew point/frost temperature units GET 151-2014 improvement was carried out in order to expand the numbers and ranges of reproducible values and improve its functionality. As a result of the improvement, a set of reference generators was developed and introduced into the State primary standard, reproducing the dew/frost point temperature and the hydrocarbon condensation temperature at high pressures of the working gas. The description of the National primary standard of relative humidity, molar (volume) fraction of water, dew/frost point temperature, hydrocarbon condensation temperature units GET 151-2020 and its complex of reference generators, which implement the reproduction of units of dew/frost temperature and hydrocarbons condensation temperature units, is presented, taking into account the influencing factors according to working gas pressure. The metrological characteristics of GET 151-2020 have been studied. A budget of the measurement uncertainty has been compiled when reproducing

the dew/frost point temperature and the hydrocarbon dew point temperature. The State verification scheme for measuring gas humidity and hydrocarbon condensation temperature was developed and approved. Topical issues of ensuring the uniformity of measurements in the field of hygrometry have been resolved. The tasks of metrological support of means for measuring the dew point temperature and the condensation temperature of hydrocarbon gases at high pressures of the working gas have been implemented. The results obtained will be useful in creating an experimental base for studying the physical properties of technical and natural gases and approving state reference data in a wide range of pressures and temperatures of the working gas.

Keywords: primary standard, gas humidity, relative humidity, molar fraction of water, dew/frost point temperature, hydrocarbon condensation temperature, two-pressure method, phase equilibrium method, state verification scheme

Введение. Влажность газов – один из важнейших параметров контроля большинства производственных процессов и различных областей деятельности человека. В сфере нефтегазовой отрасли, наряду с влажностью газа, необходимо контролировать содержание в нём углеводородных компонентов, находящихся в жидкой фазе и влияющих на надёжность и срок службы оборудования газодобычи, переработки и транспортировки газа. Немаловажным является определение содержания сконденсированных углеводородов в газах для поддержания потребительских качеств природного газа. В соответствии с РМГ 75-2014¹ для описания характеристик влажности газов чаще всего используют такие единицы величин, как молярная (объёмная) доля влаги, температура точки росы/иней (ТТР) и относительная влажность. При определении содержания углеводородной взвеси в газе используют единицу температуры конденсации углеводородов (ТКУ).

Для реализации системы обеспечения единства измерений в области гигрометрии и качества углеводородных газов необходимо воспроизведение и измерение каждой единицы величины влажности с наивысшей точностью при применении прямых абсолютных методов воспроизведения и измерения величин влажности.

Работы по обеспечению единства измерений влажности газов в Российской Федерации начаты в 1974 г. в Восточно-Сибирском филиале ВНИИФТРИ, это обусловило создание единого эталонного комплекса воспроизведения наиболее востребованных единиц влажности газов [1]. В 1986 г. разработан, исследован и аттестован Государственный первичный эталон единицы относительной влажности в газах ГЭТ 151-86. Дальнейшее расширение номенклатуры воспроизводимых величин, диапазонов измерений и функциональных возможностей ГЭТ 151-86 происходило поэтапно в связи с быстрым развитием промышленности, в том числе нефтегазовой отрасли. Этапы модернизации государственного первичного эталона единиц влажности газов происходили в периоды 2006–2010 гг., 2012–2014 гг. и 2017–2019 гг.

До настоящего времени оставалась актуальной задача обеспечения единства измерений качества влажных углеводородных газов, таких как ТТР при высоких давлениях и ТКУ. До 2021 г. в Российской Федерации отсутствовала Государственная поверочная схема для средств измерений

температуры конденсации углеводородных газов (СИ ТКУ). СИ ТКУ поверяли по частным методикам, разработанным при утверждении типа СИ и основанным на справочных данных зависимости температуры конденсации пропана от давления. Как правило, СИ ТКУ, поверенные по этим методикам, не гарантировали подтверждение нормированных метрологических характеристик измерения ТКУ в реальных природных газах. Исследования, проведённые ООО «НПО «Вымпел» совместно с компанией Open Grid Europe GmbH (крупнейший европейский оператор газотранспортной системы) показали, что результаты измерений СИ ТКУ разных типов, поверенных по указанным выше частным методикам, при совместных измерениях ТКУ в реальных природных газах, имели расхождения, достигающие значений 15 °C [2, 3]. Кроме того, характеристики СИ ТКУ, поверенных по частным методикам, ограничивались погрешностью методик ($\pm 0,5$ °C) и не могли быть аттестованы с погрешностью менее $\pm 1,0$ °C.

Усовершенствование Государственного первичного эталона единиц относительной влажности газов, молярной (объёмной) доли влаги, температуры точки росы/иней ГЭТ 151-2014 в период 2017–2019 гг. было обусловлено необходимостью создания высшего звена государственной поверочной схемы для СИ ТКУ, а также для обеспечения единства измерений в области гигрометрии в соответствии с международными требованиями и решения актуальных задач метрологического обеспечения СИ ТТР и СИ ТКУ при высоких давлениях рабочего газа не более 30 МПа.

В основу конструктивных решений при совершенствовании ГЭТ 151-2014 легли разработки Восточно-Сибирского филиала ВНИИФТРИ и опыт ведущих российских и зарубежных компаний в области гигрометрии. В ходе совершенствования ГЭТ 151-2014 обосновано применение методов воспроизведения ТТР и ТКУ [4], оценены достижимые неопределённости воспроизведения для каждой единицы величины с учётом реализации этих методов при высоких давлениях рабочей среды [5–7].

В результате проведённых исследований утверждён Государственный первичный эталон единиц относительной влажности газов, молярной (объёмной) доли влаги, температуры точки росы/иней, температуры конденсации углеводородов ГЭТ 151-2020².

¹ РМГ 75-2014. ГСИ. Измерения влажности веществ. Термины и определения.

² Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 868 от 06.05.2020 г. «Об утверждении Государственного первичного эталона единиц относительной влажности газов, молярной (объёмной) доли влаги, температуры точки росы/иней, температуры конденсации углеводородов».

Цель работы. Расширение метрологических возможностей государственного первичного эталона единиц влажности газов для обеспечения единства измерений в области гигрометрии при воспроизведении и передаче единиц ТТР и ТКУ в диапазоне давлений рабочего газа от атмосферного до 30 МПа. Создание экспериментальной базы для исследования физических свойств технических и природных газов и утверждения государственных справочных данных в широком диапазоне давлений и температур рабочего газа.

Методы воспроизведения единиц величин влажности газа и температуры конденсации углеводородов. При воспроизведении единицы относительной влажности газов с помощью ГЭТ 151-2020 применяют эталонные генераторы, реализующие метод двух давлений, который считается абсолютным и наиболее точным методом воспроизведения единицы относительной влажности. Суть метода заключается в насыщении газа влагой при повышенном давлении и последующем изотермическом дросселировании газа до рабочего давления поверяемых (контрольных) гигрометров. При этом температура насыщения газа равна температуре газа в рабочей камере для поверяемых гигрометров.

Для воспроизведения единицы молярной доли влаги используется эталонный генератор, реализующий метод фазового равновесия.

При воспроизведении единицы ТТР применяют разработанные эталонные генераторы, работа которых основана на аналогичном методе, или создаются условия квазифазового равновесия.

При воспроизведении единицы ТКУ применяются разработанные эталонные генераторы на методе фазового равновесия. При давлении в рабочей камере (камере измерителя ТКУ) P_K , равном давлению в устройстве насыщения P_H , ТКУ T_K численно равна температуре насыщения T_H . Это условие выполняется при высоком давлении, когда перепадом давления по газовому тракту можно пренебречь. При приближении давления газа в системе «устройство насыщения – измеритель ТКУ» к атмосферному процесс реализации фазового равновесия перестаёт быть изобарическим. Температура конденсации углеводородов определяется соотношением

$$T_K = T_H - \Delta T_{H-K},$$

где ΔT_{H-K} – поправка, учитывающая изменение температуры конденсации из-за перепада давления $\Delta P = P_H - P_K$ между устройством насыщения генератора и камерой измерителя ТКУ, подключённого к выходу генератора.

Отличие температуры конденсации углеводородов на выходе генератора от температуры устройства насыщения можно учесть, усовершенствовав уравнение состояния Пенга-Робинсона [8, 9], описывающее состояние углеводородных смесей, принимая во внимание условия конкретной задачи.

В результате преобразований вычислим поправку

$$\Delta T_{H-K} = (0,138694358 + 0,1227640892 \cdot 10^{-2} T_H + 0,4145627555 \cdot 10^{-6} T_H^2 - 0,7610867581 \cdot 10^{-7} T_H^3 + 1,805688854 \cdot 10^{-10} T_H^4 + 0,64683664 \cdot 10^{-10} T_H^5) \Delta P.$$

Конструкция ГЭТ 151-2020. Применяемые методы измерений, структурная схема, конструктивное исполнение измерительных установок и метрологические характеристики ГЭТ 151-2014 приведены в [10–12]. В состав ГЭТ 151-2020 дополнительно включён комплекс воспроизведения ТТР и ТКУ, состоящий из четырёх эталонных генераторов, воспроизводящих упомянутые единицы величин при абсолютном давлении рабочего газа $1 \cdot 10^2$ – $3,1 \cdot 10^4$ кПа. В качестве источника газа в разработанных генераторах можно использовать как чистый азот, так и газовые смеси, в том числе на основе горючих углеводородных газов.

Для обеспечения питания ГЭТ 151-2020 азотом высокого давления смонтирована азотная станция, способная отделять азот чистотой не менее 99,95 % из воздуха и закачивать его в ресиверы общим объёмом 160 л при избыточном абсолютном давлении не более 30 МПа. Возможность питания эталонных генераторов горючими газами повлекла за собой необходимость подготовки специальных помещений и реализацию средств обеспечения взрывобезопасности.

Внешний вид средств измерений и технологического оборудования представлен на сайте ВНИИФТРИ³.

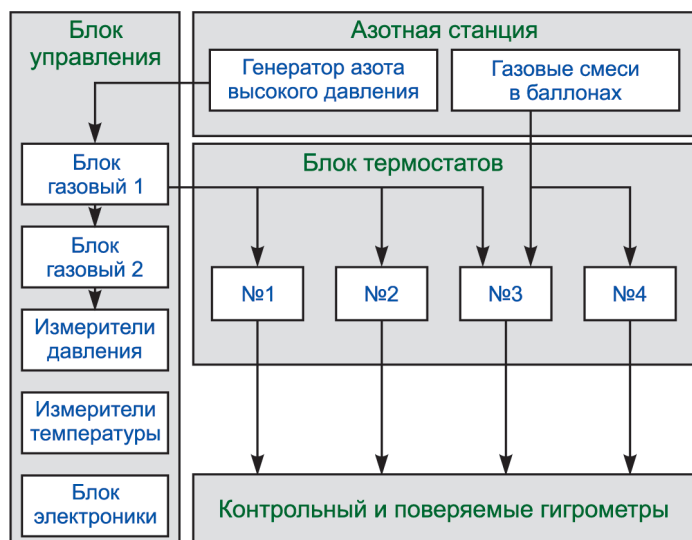
На рисунке приведена структурная схема введённого в состав ГЭТ 151-2020 аппаратного комплекса, позволяющего воспроизводить единицу ТТР (в том числе при наличии углеводородов) при высоких давлениях и единицу ТКУ. В состав комплекса воспроизведения ТТР и ТКУ входят: блок термостатов (термостаты №№ 1–4), блок управления термостатами, набор контрольных гигрометров и азотная станция для генерирования рабочего газа.

В соответствии со структурной схемой рабочий газ подаётся из азотной станции в блок регулировки давления, в котором задаются значения давления газа, поступающего в линии питания генераторов ТТР и ТКУ, системы управления пневмоклапанами и технологическую линию (продувка магистрали сброса углеводородных газов, проверка герметичности пневматических узлов и элементов эталона, продувка и осушка контрольных и поверяемых гигрометров).

В состав ГЭТ 151-2020 также включено следующее измерительное оборудование: барометр образцовый БОП-1М-3; модули давления эталонные Метран-518 (12 шт.); многоканальный прецизионный измеритель температуры МИТ-8.15; блоки регулирования температуры погружные циркуляционные М34, отвечающие за поддержание заданной температуры в термостатах генераторов. Управление клапанами осуществляет микроконтроллерный коммутационный

³ ГЭТ 151-2020. Государственный первичный эталон единиц относительной влажности газов, молярной (объёмной) доли влаги, температуры точки росы/иней, температуры конденсации углеводородов. URL: <https://www.vniiftri.ru/standards/teplofizicheskie-i-temperaturnye-izmereniya-perv/ get-151-2020-gosudarstvennyy-pervichnyy-etalon-edinit-otnositelnoy-vlazhnosti-gazov-molyarnoy-obemny/> (дата обращения: 05.08.2022).

модуль ОВЕН. Преобразователями температуры в сатураторах/сепараторах являются термометры сопротивления эталонные ПТСВ-2К-1. Аппаратные шумы при измерении температуры не превышают 0,001 °С.



Структурная схема комплекса воспроизведения температуры точки росы/иней и температуры конденсации углеводородов из состава ГЭТ 151-2020

Block diagram of the complex for reproducing the dew point/frost temperature and the condensation temperature of hydrocarbons from the composition of GET 151-2020

Таблица 1

Основные составляющие неопределённостей, %, при воспроизведении относительной влажности при рабочей температуре –60 °С и +90 °С

Источник неопределённости	φ, %	
	5	98
Рабочая температура –60 °С		
Температура	0,01	0,06
Давление насыщения	0,01	0,03
Расчёт повышающего коэффициента	0,02	0,00
Неопределённость:		
по типу В	0,03	0,06
по типу А	0,05	0,05
суммарная стандартная	0,06	0,08
расширенная (k = 2)	0,12	0,16
Рабочая температура +90 °С		
Температура	0,003	0,05
Давление насыщения	0,006	0,03
Расчёт повышающего коэффициента	0,003	0,001
Неопределённость:		
по типу В	0,007	0,06
по типу А	0,05	0,05
суммарная стандартная	0,05	0,08
расширенная (k = 2)	0,12	0,15

Задание режимов работы генераторов, сбор и обработка измерительной информации происходят под управлением оператора с помощью персонального компьютера с клавиатуры и (или) дублирующего сенсорного экрана.

Конструктивно генераторы выполнены на базе жидкостных термостатов. В полезном объёме термостатов размещены сатураторы/сепараторы. В сатураторах/сепараторах достигается фазовое равновесие между газообразной и жидкой фазой влажного газа (углеводородного газа) при заданных давлении газа и температуре термостатирования. Внешний вид термостатируемых устройств насыщения, применяемых в генераторах, представлен на сайте ВНИИФТРИ.

Блоки измерения давления включают в себя набор эталонных многопредельных модулей давления Метран-518, коммутируемых программно от персонального компьютера пневматической системой генераторов с помощью пневмоуправляемых клапанов.

Управление разработанным для ГЭТ 151-2020 оборудованием осуществляется с помощью программно-аппаратного комплекса «ЭТАЛОН 2019». Программно-аппаратный комплекс состоит из нескольких компонентов (программа-сервер и программы-клиенты), взаимодействие между которыми реализовано средствами TCP-соединения. Программное обеспечение создано в среде C++ Builder XE8. Ядро системы – программа «Сервер». Она отвечает за аппаратную работу со средствами измерений, входящими в состав ГЭТ 151-2020, и их коммутацию по цифровым последовательным интерфейсам USB, UART, RS-232 и RS-485. Программа «Сервер» открывает TCP-сервер на компьютере, на котором запускаются программы-клиенты для получения всей измерительной информации, а также для передачи управляющих сигналов на исполнительные устройства. Две программы-клиенты «Контроль давления» обеспечивают работу блоков измерения давления в устройстве насыщения и рабочей камере, отвечают за подключение к газовой системе манометра с необходимым пределом измерения и за калибровку нуля шкалы манометров. Четыре расчётных клиентских модуля для каждого эталонного генератора отвечают за задание температуры термостатирования, сбор и расчёт единиц влажности, архивирование измерительной информации.

Результаты. В процессе государственных испытаний ГЭТ 151-2020 подтверждены основные составляющие неопределённостей воспроизведения единиц относительной влажности φ, молярной (объёмной) доли влаги в газе и ТТР (табл. 1–3, где k – коэффициент охвата).

Дополнительно оценены неопределённости воспроизведения единицы температуры конденсации углеводородов, обусловленные следующими составляющими (источниками): погрешностью измерения перепада давления между устройством насыщения и рабочей камерой измерителя температуры конденсации, включающей погрешность измерения и нестабильность давления в устройстве насыщения и рабочей камере измерителя температуры конденсации и неопределённость справочных данных зависимости температуры конденсации компонентов углеводородов от давления;

Таблица 2

Основные составляющие неопределённости, %, при воспроизведении молярной доли влаги при рабочей температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$

Источник неопределённости	Молярная доля влаги, млн ⁻¹			
	0,6*	10*	4·10 ⁴ **	7·10 ⁵ **
Температура	0,2	0,2	0,1	0,1
Давление насыщения	0,07	0,07	0,07	0,07
Расчёт повышающего коэффициента	0,4	0,003	0,06	0,003
Расчёт давления насыщенного водяного пара	0,2	0,2	0,1	0,1
Неопределённость по типу В	0,5	0,3	0,17	0,16
по типу А	0,3	0,3	0,3	0,3
суммарная стандартная	0,58	0,43	0,35	0,34
расширенная ($k = 2$)	1,2	0,84	0,68	0,67

* Неопределённости приведены для рабочей температуры $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

** Неопределённости приведены для рабочей температуры $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

погрешностью измерения температуры насыщения/конденсации (температуры термостатирования);

нестабильностью и неравномерностью температуры термостатирования;

неопределённостью эмпирической зависимости (расчётные формулы), учитывающей изменение температуры конденсации из-за перепада давления между устройством насыщения/конденсации и рабочей камерой измерителя;

неполнотой насыщения (или перенасыщения) газа углеводородами.

Неопределённость воспроизведения ТКУ в результате измерения перепада давления между устройством насыщения и рабочей камерой измерителя температуры конденсации, подключаемого к выходу эталонного генератора, возрастает с понижением давления и достигает максимального значения при давлении, близком к атмосферному. Погрешность измерения давления в устройстве насыщения/конденсации и рабочей камере определяется погрешностями используемых преобразователей избыточного давления и барометра. Для измерения избыточного давления в устройстве насыщения/конденсации и рабочей камере используются многопределные модули давления эталонные Метран-518 (погрешность не более $\pm 0,03\text{ }%$ при избыточном давлении 10 кПа) и барометр БОП-1М-3 (погрешность не более $\pm 0,01\text{ }%$). Атмосферное давление измеряется одним эталонным барометром, и на результат расчёта перепада давления погрешность барометра не влияет. Использование нескольких многопределных модулей давления эталонных Метран-518, перекрывающих весь диапазон давления в устройстве насыщения/конденсации и рабочей камере, позволяет измерять давление с относительной погрешностью не более $\pm 0,05\text{ }%$, а перепад давления – с относительной погрешностью не более $\pm 0,07\text{ }%$.

Нестабильность давления определяется нестабильностью применяемых редукторов и в установившемся режиме работы генератора достигает при низких давлениях максимальных значений $\pm 0,1\text{ }%$.

В соответствии с ГОСТ Р 8.938-2017⁴ неопределённость справочных данных зависимости температуры конденсации компонентов углеводородов (например, пропана) от давления в области температуры конденсации от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ не превышает 0,06 %.

Суммарная относительная погрешность перепада давления с учётом нестабильности давления и неопределённости табличных значений давления насыщения не превышает $\pm 0,12\text{ }%$. Для рассматриваемых условий измерений неопределённость воспроизведения ТКУ составит не более 0,004 %.

Температурная составляющая неопределённости включает погрешность измерения температуры термостатирования, нестабильность и неравномерность температуры. В свою очередь,

Таблица 3

Основные составляющие неопределённости, $^{\circ}\text{C}$, при воспроизведении ТТР

Источник неопределённости	ТТР, $^{\circ}\text{C}$	
	-120	$+90$
Температура насыщения	0,002	0,001
Давление насыщения	0,0005	0,0005
Давление рабочей камеры	0,0005	0,0001
Расчёт давления насыщенного водяного пара:		
в устройстве насыщения	0,002	0,00005
в рабочей камере	0,002	0,00005
Расчёт повышающего коэффициента:		
в устройстве насыщения	0,004	0,0001
в рабочей камере	0,0004	0,0001
Неопределённость:		
по типу В	0,03	0,02
по типу А	0,05	0,05
суммарная	0,06	0,056
расширенная ($k = 2$)	0,12	0,11

погрешность измерения температуры включает погрешности измерительного преобразователя и вторичного устройства. Используемые для измерения температуры насыщения термометры сопротивления ПТСВ-2К-1 имеют абсолютную погрешность $\pm 0,005\text{ }^{\circ}\text{C}$. Погрешность вторичного измерителя МИТ-8.15 в диапазоне температур $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ не превышает $\pm 0,004\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для термостатирования устройств насыщения/конденсации применены жидкостные термостаты КРИО-МТ-07, имеющие неравномерность температурного поля в рабочем объёме не более $\pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ при нестабильности температуры не более $\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, суммарная температурная составляющая неопределённости единицы ТКУ не превышает 0,025 $^{\circ}\text{C}$.

⁴ ГОСТ Р 8.938-2017. ГСИ. Национальный стандарт. Стандартные справочные данные. Пропан жидкий и газообразный. Термодинамические свойства, коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температуре от 86 К до 700 К и давлении до 100 МПа.

Таблица 4

Основные составляющие неопределённости, °С, при воспроизведении ТКУ

Источник неопределённости	Температура конденсации, °С	
	–60	+30
Температура насыщения/конденсации	0,025	0,025
Перепад давления по газовой линии	0,004	0,004
Эмпирические данные	0,001	0,001
Недоконденсация	0,030	0,010
Неопределённость по типу В ТКУ	0,04	0,03
Неопределённость по типу А ТКУ	0,05	0,05
Суммарная неопределённость ТТР	0,07	0,06
Расширенная неопределённость ТКУ ($k=2$)	0,13	0,11

Таблица 5

СКО результатов измерений при воспроизведении ТТР, °С

T_n , °С	p_n , кПа	p_a , кПа	p_k , кПа	$T_{ТТР} \pm S(T_{ТТР})$, °С
–59,882	31,7474	96,585	26,4091	–60,185±0,001
–55,042	146,694	96,944	146,981	–55,033±0,001
–49,951	86,2617	95,662	79,5921	–50,250±0,001
–39,817	126,206	95,908	114,486	–40,291±0,003
–20,160	111,873	97,117	105,180	–20,496±0,001
–11,139	39,1129	96,630	0,00118	–14,863±0,002
5,100	0,13068	96,526	0,00194	5,081±0,005
17,905	8600,83	96,976	8601,59	17,906±0,001
29,880	2663,62	96,755	2664,01	29,882±0,001

Теоретический расчёт используемых конструкций в устройстве насыщения, трёхступенчатая система насыщения, а также экспериментальные исследования показывают, что составляющая неопределённости, обусловленная неполнотой насыщения (конденсации), на порядок меньше остальных составляющих. Выполнены экспериментальные исследования при давлениях рабочего газа в диапазоне $1 \cdot 10^2$ – $3,1 \cdot 10^4$ кПа и температурах –60...+30 °С. Тепломассообменные процессы наиболее замедленны в нижней части указанного температурного диапазона. Исследования показали, что изменение температуры конденсации при увеличении расхода газа от 3 до 5 л/мин приводит к изменению температуры конденсации не более 0,05 °С.

Таким образом, составляющая неопределённости ТКУ ΔT_k , вызванная неопределённостью поправок на систематические эффекты, определяется формулой

$$\Delta T_k = \sqrt{\Delta T_p + \Delta T_t + \Delta T_f + \Delta T_{\text{нас}}},$$

где ΔT_p – составляющая неопределённости, обусловленная погрешностью измерения перепада давления между

Таблица 6

СКО результатов измерений при воспроизведении ТКУ, °С

T_n , °С	p_n , кПа	p_a , кПа	p_k , кПа	$T_{ТКУ} \pm S(T_{ТКУ})$, °С
–50,438	31,3545	96,691	25,1604	–50,824±0,004
–49,922	2485,29	96,807	2485,00	–49,990±0,001
–40,252	31,2621	96,356	24,8841	–40,687±0,001
–15,010	2669,41	96,755	2669,64	–14,981±0,005
29,944	2489,60	96,806	2489,24	30,006±0,001

устройством насыщения и измерителем; ΔT_t – составляющая неопределённости, обусловленная погрешностью измерения и стабильностью температуры; ΔT_f – составляющая неопределённости, обусловленная неопределённостью оценки поправки к температуре конденсации в результате перепада давления (погрешность формулы); $\Delta T_{\text{нас}}$ – составляющая неопределённости, обусловленная степенью достижения состояния насыщения.

Основные составляющие неопределённости при воспроизведении ТКУ представлен в табл. 4.

В процессе исследования метрологических характеристик эталонных генераторов ТТР и ТКУ определяли среднеквадратическое отклонение (СКО) результатов измерений при воспроизведении ТТР и ТКУ при высоких давлениях по измерениям следующих характеристик (количество независимых измерений $n=15$): температуры термостатирования; давления в устройстве насыщения; давления в рабочей камере контрольного гигрометра; атмосферного давления. Результаты расчётов приведены в табл. 5, 6, где T_n – температура насыщения, p_n – давление насыщения, p_a – атмосферное давление, p_k – давление в рабочей камере, $T_{ТТР} \pm S(T_{ТТР})$, $T_{ТКУ} \pm S(T_{ТКУ})$ – значения ТТР и ТКУ, воспроизводимые с учётом СКО, соответственно.

СКО при воспроизведении ТТР не превышает 0,05 °С.

СКО при воспроизведении ТКУ не превышает 0,05 °С.

Применённые в ГЭТ 151-2020 технические решения и методы воспроизведения единиц влажности и ТКУ обеспечили его метрологические характеристики, приведённые в табл. 7, где НСП – неисключённая систематическая погрешность при доверительной вероятности $P=0,99$.

Закключение. Утверждение ГЭТ 151-2020 повлекло за собой необходимость пересмотра государственной поверочной схемы (ГОСТ 8.547-2009⁵). Результатом доработки государственной поверочной схемы стало метрологическое обеспечение новой единицы – ТКУ и переработка механизмов передачи единиц влажности: относительной влажности, молярной (объёмной) доли влаги и ТТР. В 2022 г. взамен ГОСТ 8.547-2009 утверждена Государственная поверочная схема для средств измерений влажности газов и температуры конденсации углеводородов⁶.

⁵ ГОСТ 8.547-2009. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений влажности газов.

⁶ Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15.12.2021 г. № 2885 «Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений влажности газов и температуры конденсации углеводородов».

Таблица 7

Метрологические характеристики ГЭТ 151-2020

Характеристика воспроизводимой величины	Относительная влажность	Молярная (объемная) доля	ТТР		ТКУ
Диапазон значений	5–98 %	$0,1-7 \cdot 10^5$ млн ⁻¹	–120...–60 °C	–60...+90 °C	–60...+30 °C
СКО ($n=15$)	0,05 %	0,3 %	0,05 °C	0,05 °C	0,05 °C
НСП ($P=0,99$)	0,1–0,2 %	0,13–1,4 %	<0,12 °C	0,04–0,08 °C	0,11–0,14 °C
Стандартная неопределённость: по типу А по типу В	0,05 % 0,04–0,08 %	0,3 % 0,05–0,6 %	0,05 °C 0,02–0,05 °C	0,05 °C 0,02–0,05 °C	0,05 °C 0,05–0,08 °C
Суммарная стандартная неопределённость	0,06–0,1 %	0,3–0,65 %	0,05–0,06 °C	0,05–0,06 °C	0,07–0,09 °C
Расширенная неопределённость ($k=2$)	0,13–0,2 %	0,7–1,3 %	0,11–0,12 °C	0,11–0,12 °C	0,14–0,19 °C
Рабочая температура воспроизведения величин, °C	–80...+90	–100...+90	–120...+90	–120...+90	–60...+30
Абсолютное давление газа при воспроизведении величин, кПа	$1 \cdot 10^2-2,6 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^2-2,6 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^2-3,1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^2-3,1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^2-3,1 \cdot 10^4$

Таким образом, применение ГЭТ 151-2020 и введение в действие актуализированной государственной поверочной схемы позволяют:

сократить неопределённость результатов измерений СИ ТКУ и ТТР;

повысить достоверность контроля параметров природного газа высокого давления при его переработке и транспортировании;

создать экспериментальную базу для получения государственных справочных данных о физических свойствах углеводородных газов в широком диапазоне давления и температуры;

повысить достоверность контроля параметров технологических газов при производстве чистых веществ и препаратов в химической промышленности, микроэлектронике, индустрии наносистем;

проводить испытания с целью утверждения типа отечественных и зарубежных СИ ТКУ и ТТР с учётом влияющих факторов, максимально приближенных к условиям их эксплуатации;

повысить инвестиционную активность отечественных разработчиков СИ ТКУ и ТТР в вопросах импортозамещения.

Список источников

1. Дубовиков Н. И., Соков И. А., Подмурная О. А. О метрологических возможностях генератора влажного газа на методе двух давлений // Измерительная техника. 1985. № 7. С. 55–56.
2. Деревягин А. М., Деревягин Г. А., Селезнев С. В. Актуальность и проблемы измерения температуры конденсации углеводородов в природном газе // Газовая промышленность. 2017. № 10(759). С. 64–68. EDN: <https://www.elibrary.ru/ZQJKQN>
3. Лыков А. Г., Деревягин А. М., Селезнев С. В. Анализатор точек росы по водным фазам и тяжелым углеводородам HYGROVISION-BL // Газовая промышленность. 2012. № S(680). С. 79–83. EDN: <https://elibrary.ru/SZWOUF>

4. Истомин В. А., Смирнов В. В., Бахметьев П. И., Донских Б. Д., Крашенников С. В., Макинский А. А. Анализ нормативных документов по расчетам влагосодержания и точки росы природного газа // Газовая промышленность. 2008. № 12(625). С. 22–26. EDN: <https://elibrary.ru/JWWCYF>

5. Донских Б. Д., Истомин В. А., Степанов С. А. Экспериментальное исследование равновесного содержания паров воды в метане при температурах от 233,15 до 293,15 К и давлениях до 12,5 МПа // Газовая промышленность. 2021. № 10(822). С. 72–80. EDN: <https://elibrary.ru/HQHRBI>

6. Крашенников С. В., Донских Б. Д., Донских В. Н., Елистратов А. В., Макинский А. А., Крушевнич В. Т. Оперативный метод определения концентрации воды в гликолях, используемый при подготовке природного газа к транспорту // Наука и техника в газовой промышленности. 2006. № 4(27). С. 55–58. EDN: <https://elibrary.ru/JZBRXT>

7. Донских Б. Д., Истомин В. А., Крашенников С. В., Макинский А. А. Экспериментальные исследования влагосодержания природного газа при равновесиях с конденсированными водными фазами // Вести газовой науки: научно-технический сборник 2011. № 2(7). С. 193–206. EDN: <https://elibrary.ru/RTWYYD>

8. Peng D. Y., Robinson D. B., *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1976, vol. 15, pp. 59–64. <https://doi.org/10.1021/i160057a011>

9. Фаловский В. И., Хорошев А. С., Шахов В. Г. Современный подход к моделированию фазовых превращений углеводородных систем с помощью уравнения состояния Пенга-Робинсона // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4. С. 120–125. EDN: <https://elibrary.ru/OOROPP>

10. Анашко А. А., Винге А. Ф., Винге М. А., Морозов С. А. Метрологические возможности Государственного первичного эталона единиц относительной влажности газов, молярной (объемной) доли влаги, температуры точки росы/инея

ГЭТ 151-2014 // Измерительная техника. 2017. № 2. С. 3–6. EDN: <https://elibrary.ru/XXMAQZ>

11. Винге А. Ф., Винге М. А., Подмurnая О. А., Скрыбиков Н. П., Егоров В. Н. Государственный первичный эталон единиц относительной влажности газов, молярной (объемной) доли влаги, температуры точки росы/иней ГЭТ 151-2014 // Измерительная техника. 2016. № 7. С. 3–8. EDN: <https://elibrary.ru/WMCFKD>

12. Dubovikov N. I., Podmurnaya O. A., Skryabikov N. I., Sokov I. A., Vinge A. F., *International Journal of Thermophysics*, 2016, vol. 37, 49. <https://doi.org/10.1007/s10765-015-2014-0>

References

1. Dubovikov N. I., Podmurnaya O. A., Sokov I. A., *Measurement Techniques*, 1985, vol. 28, pp. 670–673. <https://doi.org/10.1007/BF00862176>

2. Derevyagin G. A., Derevyagin A. M., Seleznev S. V., Topicality and Problems of Measuring the Hydrocarbon Condensation Temperature in Natural Gas, *GAS Industry of Russia*, 2017, no. 10, pp. 64–68. (In Russ.) EDN: <https://elibrary.ru/ZQJKQN>

3. Lykov A. G., Derevyagin A. M., Seleznev S. V., Dew Point Analyzer for water phases and heavy hydrocarbons HYGROVISION-BL, *GAS Industry of Russia*, 2012, no. S(680), pp. 79–83. (In Russ.) EDN: <https://elibrary.ru/SZWOUF>

4. Istomin V. A., Smirnov V. V., Bahmet'ev P. I., Donskih B. D., Krashennikov S. V., Makinskiy A. A., Analysis of regulatory documents on calculations of moisture content and dew point of natural gas, *GAS Industry of Russia*, 2008, no. 12(625), pp. 22–26. (In Russ.) EDN: <https://elibrary.ru/JWWCYF>

5. Donskikh B. D., Istomin V. A., Stepanov S. A., Experimental research on the equilibrium water vapor content in methane within the

temperature range of 233.15–293.15 K and pressure up to 12.5 MPa, *GAS Industry of Russia*, 2021, no. 10(822), pp. 72–80. (In Russ.) EDN: <https://elibrary.ru/HQHRBI>

6. Krashennikov S. V., Donskikh B. D., Donskikh V. N., Elistratov A. V., Makinskiy A. A., Krushnevich V. T., An operational method for determining the concentration of water in glycols used in the preparation of natural gas for transport, *Science and Technology in the Gas Industry*, 2006, no. 4(27), pp. 55–58. (In Russ.) EDN: <https://elibrary.ru/JZBRXT>

7. Donskikh B. D., Istomin V. A., Krashennikov S. V., Makinskiy A. A., Experimental study on moisture content in natural gas at equilibria with condensed water phases, *Vesti Gazovoy Nauki: collected scientific technical papers*, 2011, no. 7(2), pp. 193–206. (In Russ.) EDN: <https://elibrary.ru/RTWYYD>

8. Peng D. Y., Robinson D. B., *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1976, vol. 15, pp. 59–64. <https://doi.org/10.1021/i160057a011>

9. Falovsky V. I., Khoroshev A. S., Shakhov V. G., The modern approach to phase-behavior predictions of hydrocarbon systems by means of the Peng-Robinson equation of state, *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 13, no. 4, pp. 120–125. (In Russ.) EDN: <https://elibrary.ru/OOROPP>

10. Anashko A. A., Vinge A. F., Vinge M. A., Morozov S. A., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 103–108. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1158-7>

11. Vinge A. F., Vinge M. A., Egorov V. N., Podmurnaya O. A., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 7, pp. 685–692. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-1031-0>

12. Dubovikov N. I., Podmurnaya O. A., Skryabikov N. I., Sokov I. A., Vinge A. F., *International Journal of Thermophysics*, 2016, vol. 37, 49. <https://doi.org/10.1007/s10765-015-2014-0>

Статья поступила в редакцию 27.05.2022; одобрена после рецензирования 11.07.2022; принята к публикации 15.07.2022.
The article was submitted 27.05.2022; approved after reviewing 11.07.2022; accepted for publication 15.07.2022.

Шкала космологических расстояний. Часть 13: галактическая полярная анизотропия красного смещения квазаров и сверхновых типа SN Ia

Сергей Фёдорович Левин

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

Аннотация. Во второй половине XX в. получены данные, которые указывали на аномалии закона красного смещения Хаббла, а также выдвинута гипотеза о происхождении квазаров как выбросов из галактик с активными ядрами. К концу XX в. в Местной группе галактик обнаружены дипольная анизотропия красного смещения и аномалии оценок параметра Хаббла. Нарастающее расхождение этих оценок по сверхновым SN Ia относительно оценок параметра Хаббла по данным измерений микроволнового фонового излучения при интерпретации данных измерений в рамках различных космологических моделей и анизотропия красного смещения в 2016 г. вызвали дискуссию о кризисе в космологии, которую начали Венди Фридман и Адам Рисс. Задача идентификации шкалы космологических расстояний рассмотрена как задача калибровки. В результате её решения выявлен диполь анизотропии красного смещения сверхновых типа SN Ia – реперных точек шкалы фотометрических расстояний. Диполь имеет максимум и минимум в областях соответственно северного и южного галактических полюсов. Противоположная ориентация диполя анизотропии красного смещения для квазаров стала новым аспектом проблем шкалы космологических расстояний.

Ключевые слова: красное смещение, сверхновые SN Ia, квазары, шкала космологических расстояний, анизотропия, ранговая инверсия

Для цитирования: Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Часть 13: галактическая полярная анизотропия красного смещения квазаров и сверхновых типа SN Ia // Измерительная техника. 2022. № 10. С. 11–18. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-11-18>

Cosmological distances scale. Part 13: galactic polar redshift anisotropy of quasars and supernovae of type SN Ia

Sergey F. Levin

Moscow Institute of Expertise and Testing, Moscow, Russia, miei-metrolog@yandex.ru

Abstract. In the second half of the 20th century, for the first time, data were obtained that indicated anomalies of Hubble's redshift law. Their author was the American astronomer Helton Arp. He also hypothesized the origin of quasars as ejections from galaxies with active nuclei and was a proponent of the Big Bang theory. The latter circumstance caused numerous criticism of the results obtained by him. However, by the end of the 20th century, redshift dipole anisotropy and anomalies of Hubble parameter estimates were discovered in the Local Group of galaxies. The increasing distribution of these estimates for SN Ia supernovae relative to the estimates of the Hubble parameter based on measurements of microwave background radiation when interpreting measurement data within various cosmological models and the redshift anisotropy in 2016 caused a discussion about the crisis in cosmology. Wendy Freedman and Adam Riess started it. A brief overview of the discussion materials is given, and the problem of identifying the scale of cosmological distances is considered as a calibration problem. As a result of its solution, the redshift anisotropy dipole of supernovae of type SN Ia was revealed as reference points of the photometric distance scale. The dipole has a maximum in the region of the north galactic pole, and a minimum in the region of the south pole. The opposite orientation of the redshift anisotropy dipole for quasars has become new aspect of the problems of the cosmological distance scale.

Keywords: redshift, supernovae SN Ia, quasars, cosmological distance scale, anisotropy, rank inversion

Введение. В 1960 г. американский астроном Хэлтон Арп удостоен премии имени Хелен Уорнер Американского астрономического общества за значительный вклад в наблюдательную и теоретическую астрономию. Спустя шесть лет он опубликовал «Атлас пекулярных галактик» (далее – атлас) с 338 фотографиями [1]. На одной из них изображены галактики NGC 7603 и NGC 7603B, соединённые перемишкой,

на концах которой наблюдались квазары с красными смещениями $z=0,243$ и $z=0,391$ [2]. Согласно закону Хаббла для лучевой скорости $cz=H_0D_L$ (c – скорость света; H_0 – постоянная (параметр) Хаббла; D_L – фотометрическое расстояние [3]) различие красных смещений галактик ($z=0,029$ и $z=0,057$) указывало на то, что галактика NGC 7603B находится на 436 млн св. лет дальше. К взаимодействующим

(т. е. равноудалённым) объектам были отнесены галактика NGC 4319 ($z=0,004923$) с квазаром Markarian 205 ($z=0,070846$) и галактики квинтета Стефана – NGC 7317 ($z=0,022012$), NGC 7318A ($z=0,022115$), NGC 7318B ($z=0,019260$), NGC 7319 ($z=0,022823$) и NGC 7320C ($z=0,002625$). Причём на фоне галактики NGC 7319 был квазар с красным смещением $z=2,114$ [4].

Публикация атласа [1] вызвала среди астрономов и космологов противоречивые мнения. Но в действительности Х. Арп преследовал другую цель. Классификацию галактик в 1926 г. разработал Э. Хаббл. В 1950-е гг. под его руководством поиском новых звезд в галактике М 31 (туманность Андромеды) занимался Х. Арп. Атлас [1] дополнил эту классификацию. Х. Арп связал происхождение квазаров с выбросами из галактик с активными ядрами и стал противником теории Большого взрыва. Последнее обстоятельство и вызвало многочисленную критику результатов его исследований.

В 1983 г. Х. Арп изучал системы спиральных галактик М 31 и М 81. Доплеровская интерпретация фиолетового смещения $z < 0$ в спектрах излучения приписывала этим галактикам лучевые скорости $V_h = -301 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ при $z = -0,001$; $V_h = -36 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ при $z = -0,000113$ [5]. Смещение в спектрах излучения карликовых галактик-спутников спиральных галактик не вписывалось в закон Хаббла: оно нарастало во все стороны от М 31 и М 81 (таблица, где полужирным шрифтом

выделены указанные карликовые галактики-спутники, в скобках приведены разности лучевых скоростей относительно центральной галактики). Аналогичная аномалия присуща и карликовым спутникам нашей Галактики – Малого (SMC) и Большого (LMC) Магеллановых облаков. Если большинство космологов считало оптической иллюзией взаимодействующие объекты атласа [1], то аномалии в системах спиральных галактик М 31, М 81 и Млечный путь были уже астрометрическими результатами.

На аномальный рост оценок локального параметра Хаббла H_0 в радиусе 1–2 Мпк в 1971 г. указал А. Сэндейдж [6], а в 1988 г. Р. Талли обнаружил в диапазоне 7–30 Мпк пик $H_0 \approx 90 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ [7].

В 1992 г. Х. Арп предложил двухкомпонентную модель красного смещения квазаров $z_{\text{кв}} = (1+z_0)(1+z_v) - 1$, где $z_0 = 2,6 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-0,2\mu}$ – собственное красное смещение квазаров с абсолютной звездной величиной μ , z_v – «красное смещение из-за скорости объекта» [8]. Принято считать, что с учётом формулы Стефана-Больцмана, зависимостей «светимость – абсолютная звёздная величина» и «масса – светимость», собственное красное смещение квазара эквивалентно гравитационному смещению. К 1995 г. установлено, что распределение квазаров по красному смещению имеет максимум при $z \approx 2$ и далее быстро спадает [9].

В 1997 г. для Местной группы галактик данные [6, 7] об аномалиях красного смещения уточнили И. Д. Караченцев и Д. И. Макаров [10]. Они зафиксировали рост локального параметра Хаббла H_0 до $95 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ к расстоянию 2 Мпк с уменьшением до $65\text{--}70 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ к расстоянию 8 Мпк. Также был идентифицирован эллипсоид локального параметра Хаббла, $(81 \pm 3, 62 \pm 3, 48 \pm 5) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$, ориентированный большой осью в точку с экваториальными координатами $\alpha \approx 13^{\text{h}}$ и $\delta \approx -15^\circ$ в созвездии Virgo (полужирным шрифтом выделено значение параметра для большой оси).

С одной стороны, появление закона и параметра Хаббла H_0 открыло в космологии новую возможность – определение космологических расстояний по красному смещению. С другой стороны, динамика оценок H_0 стала в космологии неявным признаком кризиса, так как по мере расширения доступной наблюдениям инструментальными средствами части Вселенной эти оценки к 1971 г. уменьшились с 530 до $50 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ [11]. Стремительное падение оценок параметра Хаббла на протяжении XX в. привело к тому, что собственно красное смещение для внегалактических объектов превратилось в самостоятельную шкалу порядка. Это породило цепочку сомнений. Справедлив ли закон Хаббла для космологических расстояний? Является ли красное смещение следствием расширения Вселенной, и какова его природа? Был ли Большой взрыв вообще?

К концу XX в. группами High-Z SN Search Team [12] и Cosmology Supernova Project [13] обнаружено «ускорение расширения Вселенной» и получена согласованная оценка $H_0 = (65,2 \pm 1,3) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$. Это открытие вызвало огромное количество теоретических исследований и возродило веру в метрический характер шкалы космологических расстояний на основе красного смещения. Но несмотря на рост

Аномалии в системах М 31 и М 81

Объект	$V_h, \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$	$D_L, \text{ Мпк}$
Галактика М 31		
NGC 404	–47 (+254)	2,30
NGC 205	–236 (+65)	0,85
NGC 598 (М 33)	–180 (+121)	0,84
And I	–370 (–69)	0,81
NGC 224 (М 31)	–301 (0)	0,77
NGC 221 (М32)	–207 (+94)	0,76
And III	–352 (–51)	0,76
NGC 147	–163 (+138)	0,76
NGC 185	–251 (+50)	0,62
NGC 6822	–56 (+245)	0,50
SMC ($z=0,000527$)	175	0,06
LMC ($z=0,00093$)	317	0,05
Галактика М 81		
Holmberg I	136 (+172)	6,66
NGC 2976	3 (+39)	4,57
NGC 3034 (М 82)	216 (+252)	3,90
К 61	–135 (–99)	3,80
IC 2574	46 (+82)	3,78
NGC 3031 (М 81)	–36 (0)	3,63
UGC 4483	156 (+192)	3,63
Holmberg II	158 (+188)	3,60
NGC 3077	13 (+49)	3,49
NGC 2366	100 (+136)	3,45
NGC 2366	100 (+136)	3,45
NGC 4236	60 (+96)	3,24
NGC 2403	130 (+166)	3,18

точности астрофизических измерений кризис в космологии всё-таки случился, и появились вопросы для дискуссии.

Цель настоящей статьи – анализ математических моделей шкалы космологических расстояний в измерительной задаче её калибровки.

Тупиковая ситуация в космологии. В 2016 г. группа Planck Collaboration по данным измерений космического зонда получила оценку $H_0 = (66,93 \pm 0,62) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ [14], а группа High-Z SN Search Team – новую оценку $H_0 = (73,23 \pm 1,74) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ [15]. Эта новая оценка отклонилась от оценки Planck Collaboration более чем на «три сигма нормального закона» (подробнее о дискуссии см. [16]). На такое «критическое расхождение» обратили внимание специалисты Carnegie-Chicago Hubble Program, заявив о кризисе в космологии [17]. В. Фридман, лидер Hubble Space Project, оценила эту ситуацию в космологии как тупиковую [18], полагая выход из нее в «повышении точности шкалы внегалактических расстояний до 1 %».

В 2018 г. показано, что по критерию минимума среднего модуля погрешности неадекватности (СМПН) принятое в [15] приближение модели Фридмана-Робертсона-Уокера формулой Тейлора 3-го порядка

$$D_L(z) = \frac{c}{H_0} \left(z + \frac{1-q_0}{2} z^2 - \frac{1-q_0-3q_0^2+j_0}{6} z^3 \right),$$

где q_0, j_0 – параметры замедления и толчка соответственно, для данных о сверхновых [12, 13] избыточно [19]. По этому критерию для тех же данных точнее были полученные в 1942 г. О. Хекманом [20] приближение формулой 2-го порядка

$$D_L(z) = \frac{c}{H_0} z \left(1 + \frac{1-q_0}{2} z \right)$$

и обобщающая его интерполяционная модель с параметром формы α [21]:

$$D_L(z) = \frac{c}{H_0} \alpha \left[(1+z)^{1/\alpha} - 1 \right].$$

В 2020 г. для данных о сверхновых SN Ia [12, 13] получена более точная (СМПН = **247,42842** Мпк; CAO = **226,03539** Мпк) анизотропная модель

$$\tilde{D}_L(l, b, z) = \frac{c}{H_0} \left[(1+a_b b) z + \frac{1-q_0}{2} (1+a_l l) z^2 \right], \quad (1)$$

где $a_l = -2,568655129 \cdot 10^{-3}$; $a_b = +2,027311498 \cdot 10^{-3}$ – коэффициенты анизотропии; $H_0 = 60,80404264 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$; $q_0 = -0,14378664$ [22, 23].

Тогда и выяснилось, что требование [18] «по точности ... до 1 %» к шкале космологических расстояний недостижимо не только из-за путаницы между средним квадратическим отклонением (СКО) выборки и СКО среднего арифметического. Дело ещё и в центральном выводе нобелевской лекции [24]: «Казалось, что самые первые данные вблизи $z=0,4$ свидетельствуют о замедляющейся Вселенной без

космологической постоянной. Однако измеренные семь точек давали слишком большой разброс. Даже одна хорошо промеренная на телескопе имени Хаббла сверхновая на вдвое большем красном смещении $z=0,83$ стала свидетельствовать о совсем другой истории расширения. Только после измерения 42 сверхновых стало окончательно ясно, что далекие SN Ia свидетельствуют об ускоренном расширении Вселенной, в которой доминирует космологическая постоянная, а не обычное вещество».

Действительно, в выборке из 42 сверхновых SN Ia [13] наибольшее красное смещение $z=0,83$ имеет сверхновая SN 1997ap на расстоянии 3265,9 Мпк в созвездии Virgo ($\alpha = 13^h 47^m 09,90^s$; $\delta = +2^\circ 23' 57,5''$). Но в этой выборке присутствует сверхновая SN 1996cl с меньшим красным смещением $z=0,828$ на большем расстоянии 3801,9 Мпк в созвездии Leo ($\alpha = 10^h 56^m 59,13^s$; $\delta = +3^\circ 37' 36,4''$). А это и есть ранговая инверсия, нарушающая условие порядка для шкал расстояний.

Строго говоря, модели шкал космологических расстояний на основе красного смещения в действительности являются моделями пространственно-временных трендов. Условные по СМПН относительные отклонения упомянутых сверхновых от характеристики положения модели (1) составляют [16]:

$$\frac{247 \text{ Мпк}}{3265 \text{ Мпк}} \cdot 100 = 7,6 \%; \quad \frac{247 \text{ Мпк}}{3801 \text{ Мпк}} \cdot 100 = 6,5 \%.$$

Такие характерные отклонения явно не вписываются в 1 %.

В 2020 г. анализ [22] гипотез об «ускорении расширения Вселенной» вследствие «космических толчков» при $z=0,763$ [13] и $z=0,46 \pm 0,13$ [12] показал, что этим данным соответствуют «разладки» моделей шкал при $z=0,44 \dots 0,48$ и при $0,763 \leq z \leq 0,828$. Но не ясно, это – «подтверждение гипотез» или «разладки» ошибочно приняты за «толчки». Тогда и был сделан вывод о том, что шкала $D_L(z)$ на основе сверхновых SN Ia метрической не является [22].

Однако в том же 2020 г. более подробный анализ трёхмерной модели (1) шкалы космологических расстояний $D_L(b, l, z)$ для галактических координат (l, b) показал ранговые инверсии SN Ia, амплитуда которых носит мультипликативный характер [23]. Это в некоторой степени объясняет вековое падение оценок параметра Хаббла по мере расширения границ наблюдаемой части Вселенной. Но так как анализ [23] выполнен исключительно для данных из работ [12, 13, 25–26], то фактически в этих работах показано, что шкала на основе фотометрии и красных смещений SN Ia не имеет статуса даже порядковой шкалы. Иначе следует признать ошибочность определений фотометрических расстояний до сверхновых SN Ia [12] многоцветным методом формы кривой блеска (multicolor light curve shape method, MLCS) – ($H_0 = (65,2 \pm 1,3) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$) или методом растяжения (template-fitting method) по шаблонам кривых яркости ($H_0 = (63,8 \pm 1,3) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$). А ведь в 1998 г. близость этих оценок служила доказательством эффективности указанных методов.

При этом существование ранговых инверсий было очевидно ещё в 1929 г. из-за статистического разброса красных

смещений галактик относительно характеристики положения закона Хаббла [3], полученной методом наименьших квадратов. Э. Хаббл пытался установить зависимость красного смещения от направления, но безрезультатно.

Метрология и шкала космологических расстояний.

Расхождение оценок параметра H_0 , сменившее их падение, является лишь поводом для дискуссии о тупиковой ситуации в космологии. По-видимому, кризис в космологии связан с метрологическим качеством математических моделей шкал космологических расстояний и методов их идентификации, с их структурной и параметрической неадекватностью. В метрологическом плане подобная ситуация характерна для проблем калибровки средств измерений.

Дело в том, что в терминах метрологии основная измерительная задача космологии формулируется как задача калибровки или градуировки шкалы космологических расстояний. Математические модели зависимости расстояния до внегалактических объектов от красного смещения в спектрах их излучения фактически являются калибровочными (градуировочными) функциями. Результатом калибровки является диаграмма, которая несёт сведения о доверительных границах погрешностей калибровочной функции.

В определённой степени проясняют смысл дискуссии о «тупиковой ситуации в космологии» результаты [27–34], полученные стандартными тестами на неадекватность моделей шкалы космологических расстояний согласно Р 50.2.004-2000¹ по программам «ММК-стат» [35, 32] и «ММК-стат М» [36] для данных о SN Ia [12, 13, 25, 26], по которым принято решение об «ускорении расширения Вселенной».

Дело в том, что несмотря на обилие данных о SN Ia, композиционно однородную совокупность без ненулевого «нуль-пункта» характеристики положения образуют только объединённые данные [12, 13] при $N=79$ и [12, 13, 37] при $N=112$. Случай $N=79$ предпочтительнее по критерию минимума СМГН [38]. Данным о SN Ia [12, 13] в классе трёхмерных степенных рядов 3-й степени минимуму СМГН=247,42842 Мпк соответствует модель (1) с оценкой калибровочной функции [19]:

$$D_L(l, b, z) = 4930,4692z + 2819,7024z^2 + 9,9955969bz - 12,664675/z^2 \pm 247,42842. \quad (2)$$

Оценка (2) нечувствительна к выбросу $z=0,97$ сверхновой SN 1997ck, что в конце 1990-х гг. беспокоило группу High-Z SN Search Team [12].

В принятой [12, 13] модели Фридмана-Робертсона-Уокера

$$D_L(z) = \frac{c}{H_0} (1+z) \int_0^z \left[(1+x)^2 (1+\Omega_m) - \Omega_\Lambda x(2+x) \right]^{-1/2} dx$$

параметры «тёмной массы» Ω_m и «тёмной энергии» Ω_Λ физической интерпретации не получили, а условие $\Omega_k + \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ при параметре кривизны $\Omega_k = 0$ в так называемой «плоской Вселенной» принято для согласования с угловым

спектром мощности реликтового фона, полученным в рамках Λ CDM-модели [39]. Однако рассогласование оценок этого спектра с данными измерений для низких мультиполей в Λ CDM-модели не устранено.

Заметим, что в работах [12, 13] получены различающиеся оценки Ω_m и Ω_Λ (подробнее см. [16]), которые пришлось «сводить» ради $\Omega_k = 0$.

Другими словами, решение задачи структурно-параметрической идентификации полной модели Фридмана-Робертсона-Уокера как модели максимальной сложности при нефиксированном параметре Ω_k так и не получено. И вопросы к качеству согласования моделей и данных измерений остаются.

Вместе с тем ранговые инверсии [23] в модели шкалы космологических расстояний (1) и её оценке (2) – не что иное, как аномалии красного смещения [1]. И тогда «Controversies by Halton Arp» (идеям Х. Арпа о красном смещении квазаров в [40]) могут соответствовать гипотезы $z(l, b)$ или $z(\alpha, \delta)$ на основе двумерных степенных рядов или рядов Тейлора, где галактические или экваториальные координаты внегалактических объектов должны играть роль влияющих величин в задаче калибровки [41].

Эффект Доплера и анизотропия красного смещения.

В 1998 г. по программе «ММК-стат М» [36] для данных 1966–1974 гг. о 124 квазарах [11, ч. 1, табл. 31] получена модель логарифмической диаграммы Хаббла

$$\begin{aligned} \lg cz = & -1,8650157 \cdot 10^{-3} \delta - 2,6945406 \cdot 10^{-1} \alpha + \\ & + 8,2279198 \cdot 10^{-2} m + 4,3915797 \cdot 10^{-2} \theta + \\ & + 2,2102848 \cdot 10^{-3} \alpha^2 + 1,2364350 \cdot 10^{-2} \alpha m + \\ & + 4,9220020 \cdot 10^{-5} \theta^2 + 1,0164755 \cdot 10^{-4} \theta \delta - \\ & - 3,3828735 \cdot 10^{-3} m \theta \pm 3,6628562 \cdot 10^{-1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где c – скорость света; $z > 0$ – красное смещение; δ – склонение; α – прямое восхождение; m – звездная величина; θ – максимальные угловые размеры [42].

Модель (3) выявила в плоскости $[\lg cz, \alpha]$ диполь анизотропии красного смещения в среднем (характеристики диполя – максимум $\bar{z}$ при $\alpha \approx 1^h \rightarrow$ минимум $\bar{z}$ при $\alpha \approx 13^h$), соответствующий по прямому восхождению апексу движения Солнца относительно реликтового фона и галактической полярной оси (линия [Южный полюс P_S : $\alpha = 0^h 40^m$ и $\delta = -28^\circ$, Sculptor] $\rightarrow$ [Северный полюс P_N : $\alpha = 12^h 40^m$ и $\delta = +28^\circ$, Coma Berenices]). При этом была отмечена аналогия с анизотропией реликтового излучения.

В 1969 г. обнаружено, что температура реликтового фона в направлении на южный галактический полюс P_S на 0,1 % ниже, чем в среднем, а в направлении на северный галактический полюс P_N – на столько же выше [43]. Этот максимум связан с эффектом Доплера при движении Солнца в сторону созвездий Virgo и Leo со скоростью около $(370 \pm 3) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ в точку с экваториальными координатами эпохи J1950

¹ Р 50.2.004-2000. ГСИ. Определение характеристик математических моделей зависимостей между физическими величинами при решении измерительных задач. Основные положения.

$\alpha = 1^{\text{h}} 38^{\text{m}}$ и $\delta = -3^{\circ} 25'$ [44], а по данным [45] – со скоростью $(368 \pm 2) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ в точку $\alpha = 1^{\text{h}} 9^{\text{m}}$ и $\delta = -6^{\circ} 53'$.

Тот факт, что диполь анизотропии красного смещения квазаров ориентирован минимумом в область около северного галактического полюса P_N , не противоречит современным физическим соображениям.

В этом направлении находится самая массивная в наблюдаемой части Вселенной система сверхскоплений галактик (Shapley Supercluster, Virgo Supercluster и Laniakea Supercluster), притягивающая (т. е. вызывающая ускорение) Местную группу галактик в направлении созвездий Hydra и Virgo ($\alpha \approx 12^{\text{h}} \dots 14^{\text{h}}$). Это приводит к появлению в ряде случаев даже к фиолетовому смещению в спектрах галактик.

В области же около южного галактического полюса P_S расположен Eridanus Supervoid или самая большая в наблюдаемой части Вселенной пустота (супервоид) – CMB Cold spot². Поэтому доплеровская составляющая красного смещения внегалактических объектов в направлении Hydra, Virgo и Leo для «расширяющейся Вселенной» должна быть меньше. И если красное смещение действительно связано с кинематическим или космологическим эффектом Доплера, то этот эффект должен проявляться единообразно для любых источников излучения – и квазаров, и сверхновых SN Ia.

В то же время локальные значения параметра Хаббла для галактик Местной группы составляют $H_0 > 80 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ в Virgo и $H_0 < 50 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ в Eridanus [10].

В XXI в. в области северного галактического полюса P_N в созвездиях Virgo, Coma Berenices и Leo открыты квазары с большими красными смещениями: SDSS J1148+5251 ($z=6,419$); SDSS J1030+0524 ($z=6,28$); ULAS J1120+0641 ($z=7,085$); ULAS J1342+0928 ($z=7,54$).

В области южного галактического полюса P_S в созвездиях Taurus и Eridanus, в котором находится Eridanus Supervoid, были открыты квазары CFHQS J2329-0301 ($z=6,43$), J0439+1634 ($z=6,51$) и J0313-1806 ($z=7,64$). Но это не внесло принципиальных изменений в распределение квазаров. На их концентрацию с большими красными смещениями к минимуму в распределении теплового реликтового фона во второй половине 1960-х гг. обратили внимание Д. Вилкинсон и Р. Патридж [46]. По мнению Н. С. Кардашева [47], это совпадение может быть сильным аргументом в пользу космологической природы красного смещения и анизотропии модели вселенной.

Для 79 сверхновых SN Ia [12, 13] зависимость $z(l, b)$ в классе двумерных степенных рядов 3-й степени даёт характеристику положения

$$\begin{aligned} z(l, b) = & 8,4388414 \cdot 10^{-3} l + 2,0329349 \cdot 10^{-3} b - \\ & - 4,6150315 \cdot 10^{-5} l^2 + 6,7421134 \cdot 10^{-8} l^3 - \\ & - 7,1086515 \cdot 10^{-7} b^3 + 3,9645819 \cdot 10^{-8} l^2 b \pm 0,20036946. \end{aligned} \quad (4)$$

Модель (4) в проекции на плоскость $[z, b]$ имеет чёткий максимум в северной галактической полусфере вблизи P_N

и минимум в противоположном направлении. Для выборки сверхновых $N=112$ контраст между полусферами еще больше.

Таким образом, *диполь анизотропии красного смещения* сверхновых типа SN Ia, по которым было обнаружено «ускорение расширения Вселенной» [12, 13], и *диполь анизотропии красного смещения* квазаров [11, 42] *по максимуму имеют противоположную ориентацию*.

Заключение. С момента обнаружения квазаров в качестве природы их красного смещения рассматривались гравитационный и доплеровский эффекты [47]. Позже появилось представление о квазарах как о чёрных дырах в окружении аккреционных дисков, что объясняло уникальную светимость квазаров. Но реальных определений расстояний до квазаров до сих пор нет.

В 1998 г. в астрономии появился термин «пузырь Хаббла», означающий «отклонение локального значения параметра Хаббла от глобального среднего значения» [47]. Авторы [48] изучили пекулярные скорости 44 сверхновых SN Ia для проверки гипотезы о существовании локальной пустоты – воида. При этом была отмечена аналогия с анизотропией реликтового излучения, и установлено, что Земля находится внутри относительно пустой области пространства с «недостачей» плотности около 20 % (плотность воида на 20 % меньше плотности окружающего его пространства) и окружена более плотной оболочкой, то есть «пузырём».

Другими словами, если бы Земля находилась внутри или *рядом* с центром области межзвёздного пространства с очень низкой плотностью, то более плотное вещество снаружи такой области с заметной силой притягивало бы вещество из центра области с низкой плотностью. Звёзды внутри «пузыря Хаббла» двигались бы в направлении от Земли с ускорением и со скоростями, отличающимися по величине и направлению.

В 2007 г. в работе [49] на основе анализа сверхновых и полного спектра реликтового фона с учётом ряда ограничений (барионных акустических колебаний, возраста объектов, нуклеосинтеза Большого взрыва, комптоновского искажения и др.) сделан вывод о том, что модели воидов предсказывают очень низкие значения локального параметра Хаббла.

В работе [50] изучалось влияние космической пыли Млечного пути на соотношение между светимостью и красным смещением сверхновых SN Ia для обнаружения «пузыря Хаббла» – отклонения локального значения параметра Хаббла от усреднённого значения. Итогом исследований стал вывод: «либо внутренние цвета SN более сложны, чем можно описать с помощью одного параметра формы кривой блеска, либо пыль вокруг сверхновых SN Ia необычна. Распутывание этих возможностей является одновременно и проблемой, и возможностью для масштабного исследования SN Ia». Однако гипотеза о «пузыре Хаббла» объясняет «ускорение расширения Вселенной» без привлечения гипотезы о «тёмной энергии», характеризуемой параметром Ω_Λ .

² Холодное пятно (Cold spot) обнаружено 24 августа 2007 г. По самым скромным подсчётам ширина этой области от 150 до 500 млн св. лет, а глубина – от 6 до 10 млрд. св. лет (по расчётам вся Вселенная простирается на 93,5 млрд. св. лет). Радиус Холодного пятна составляет около 5° , его центр находится в точке ($l=207,8^\circ$ и $b=-56,3^\circ$ или $\alpha=03^{\text{h}} 15^{\text{m}} 05^{\text{s}}$ и $\delta=-19^\circ 35' 02''$) при $z \approx 1$ [43].

Исследование [51], проведённое в 2015 г., показало существование супервоида радиусом 1,8 млрд. св. лет на расстоянии 3 млрд. св. лет в направлении Холодного пятна, вероятно, связанного с ним.

В 2021 г. подтверждено обнаружение Supervoid Eridanus как «значительной пониженной плотности в направлении Холодного пятна при $z < 0,2$ » [52]. По космологическим масштабам это – *рядом*.

Таким образом, разнонаправленная ориентация диполей анизотропии красного смещения для квазаров и сверхновых SN Ia снова подняла вопрос о природе красного смещения в проблеме определения космологических расстояний.

Правда, может быть всё гораздо проще. Красное смещение для сверхновых во многих случаях определяется по красному смещению родительских галактик, так как продукты взрыва движутся навстречу наблюдателю со скоростями расширения оболочки вблизи уровня фотосферы порядка $(1...2) \cdot 10^4 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ и дают фиолетовое смещение. Реже красное смещение сверхновых типа SN Ia определяется по смещениям минимумов абсорбционных компонентов спектральных линий [12].

Напомним, локальные значения параметра Хаббла именно для галактик Местной группы в северной галактической полусфере выше, чем в южной [10].

Список источников / References

1. Arp H. C., *Atlas of Peculiar Galaxies*, California Institute of Technology, 1966. 190 p.
2. Lórez-Corredoir M., Gutierrez C. M., *Astronomy & Astrophysics*, 2002, vol. 390, no. 3, L15–L18. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020476>
3. Hubble E., A relation between distance and radial velocity among extragalactic nebulae, *Proceedings National Academy of Science*, 1929, vol. 15, pp. 168–173.
4. Galianni P., Burbidge E. M., Arp H., Junkkarinen V., Burbidge G., Zibetti S., *Astrophysical Journal*, 2005, vol. 620, no. 1, pp. 88–94. <https://doi.org/10.1086/426886>
5. Arp H., How Non-velocity red shifts in Galaxies Depend on Epoch of Creation, *Apeiron*, 1991, vol. 1, no. 9–10, pp. 53–80.
6. Sandage A. R., The age of the galaxies and globular cluster, problems of finding the Hubble constant and deceleration parameter, in *Nuclei of galaxies*, ed. D. C. O'Connell, Vatican City, Pontifical academy of sciences, 1971, p. 601.
7. Tully R. B., Origin of Hubble constant Controversy, *Nature*, 1988, vol. 334, pp. 209–212.
8. Arp H. C., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1992, vol. 258, p. 800–810. <https://doi.org/10.1093/MNRAS/258.4.800>
9. Shaver P. A., *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1995, vol. 759, p. 87–109. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1995.tb17518.x>
10. Макаров Д. И. Движения галактик на больших и малых масштабах: дисс. канд. физ.-мат. наук (Н. Архыз, Специальная астрофизическая обсерватория РАН, 2000) [Makarov D. I., Candidate dissertation Mathematics and Physics (Arkhyz, Special astrophysical laboratory, RAN, 2000)].
11. Ленг К. Астрофизические формулы: Руководство для физиков и астрофизиков. Часть 1: пер. с англ. Ю. К. Земцова, И. Г. Персианцева и В. Е. Чертопруд под ред. Л. А. Покровского и В. Л. Хохловой. 448 с. Часть 2: пер. с англ. А. Г. Дорошкевича, А. В. Засова и М. Ю. Хлопова под ред. Д. К. Надежина и Л. М. Озерного. М.: Мир, 1978. 384 с. [Lang K. R., *Astrophysical formulae: A Compendium for the Physicist and Astrophysicist*, Part 1–2, Berlin, N.Y., Springer-Verlag, 1980, 783 p.].
12. Riess A. G. et al., *Astronomical journal*, 1998, vol. 116, p. 1009–1038. <https://doi.org/10.1086/300499>
13. Perlmutter S. et al., *Astrophysical Journal*, 1999, vol. 517, pp. 565–586. <https://doi.org/10.1086/307221>
14. Planck Collaboration. Planck intermediate results. XLVI. Reduction of large-scale systematic effects in HFI polarization maps and estimation of the reionization optical depth, *Astronomy & Astrophysics*, 2016, vol. 596, A107. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628890>
15. Riess A. G. et al., *Astrophysical Journal*, 2016, vol. 826, no. 1, 56. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/826/1/56>
16. Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Часть 10. Глобальная анизотропия // Измерительная техника. 2020. № 10. С. 9–25. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-10-9-25> [Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 63, no. 10, pp. 780–797. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01854-z>].
17. Beaton R. L., Freedman W. L., Madore B. F. et al., *Astrophysical Journal*, 216, vol. 832, no. 2, 210. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/832/2/210>
18. Freedman W. L., *Nature Astronomy*, 2017, vol. 1, 0169. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.02739>
19. Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Часть 7. Новый казус с постоянной Хаббла и анизотропные модели // Измерительная техника. 2018. № 11. С. 15–21. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-11-15-21> [Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 61, no. 11, pp. 1057–1065. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01549-6>].
20. Heckmann O., *Theorien der Kosmologie*, Berlin, Springer, 1942, 114 p.
21. Левин С. Ф. Оптимальная интерполяционная фильтрация статистических характеристик случайных функций в детерминированной версии метода Монте–Карло и закон красного смещения. М.: АН СССР, НСК, 1980. 56 с. [Levin S. F., *Optimal'naya interpolacionnaya fil'traciya statisticheskikh harakteristik sluchajnyh funkcij v determinirovannoj versii metoda Monte-Karlo i zakon krasnogo smeshcheniya*, Moscow, AN SSSR, NSK, 1980. 56 p. (In Russ.)].
22. Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Часть 11. «Экстраординарные» доказательства и проблема «космического толчка» // Измерительная техника. 2020. № 11. С. 3–8. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-11-3-8> [Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 63, no. 11, pp. 849–855. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01874-9>].

23. Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Часть 12. Конфлюэнтный анализ, ранговая инверсия и тесты на неадекватность // Измерительная техника. 2020. № 12. С. 13–21. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-12-13-21> [Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 63, no. 11, pp. 940–949. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01876-7>].
24. Перлмуттер С. Нобелевская лекция. Стокгольм. 08.12.2011 г. // Успехи физических наук. 2013. Т. 183. № 10. С. 1060–1077 [Perlmutter S., *Nobel Lecture*, Stockholm, 08.12.2011].
25. Riess A. G. et al., *Astrophysical Journal*, 2004, vol. 607, pp. 665–687. <https://doi.org/10.1086/383612>
26. Riess et al., *Astrophysical Journal*, 2007, vol. 659, pp. 98–121. <https://doi.org/10.1086/510378>
27. Левин С. Ф. Фотометрическая шкала космологических расстояний. Часть II. «Неожиданные» совпадения // Измерительная техника. 2014. № 4. С. 3–7 [Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 378–384. <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0464-6>].
28. Левин С. Ф. Математическая теория измерительных задач: Приложения. Катастрофический феномен в космологии // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2014. № 3. С. 8–13 [Levin S. F., *Matematicheskaya teoriya izmeritel'nyh zadach: Prilozheniya. Katastroficheskij fenomen v kosmologii, Kontrol'no-izmeritel'nye pribory i sistemy*, 2014, no. 3, pp. 8–13. (In Russ.)].
29. Левин С. Ф. Математическая теория измерительных задач: Приложения. Катастрофический феномен в космологии // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2014. № 4. С. 35–38 [Levin S. F., *Matematicheskaya teoriya izmeritel'nyh zadach: Prilozheniya. Katastroficheskij fenomen v kosmologii, Kontrol'no-izmeritel'nye pribory i sistemy*, 2014, no. 4, pp. 35–38. (In Russ.)].
30. Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Часть 5. Метрологическая экспертиза по сверхновым типа SN Ia // Измерительная техника. 2016. № 8. С. 3–10 [Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 8, pp. 791–802. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-1047-5>].
31. Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Часть 6. Статистическая анизотропия красного смещения // Измерительная техника. 2017. № 5. С. 3–6. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2017-5-3-6> [Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 5, pp. 411–417. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1211-6>].
32. Левин С. Ф. Измерительные задачи статистической идентификации шкалы космологических расстояний // Измерительная техника. 2011. № 12. С. 17–22 [Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 54, no. 12, pp. 1334–1341. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-9892-3>].
33. Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Часть 8. Масштабный фактор // Измерительная техника. 2019. № 1. С. 8–15. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-1-8-15> [Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 7–15. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01578-1>].
34. Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Часть 9. Параметр замедления // Измерительная техника. 2019. № 10. С. 8–14. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-10-8-14> [Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 62, no. 10, pp. 855–862. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01705-3>].
35. Левин С. Ф., Блинов А. П. Научно-методическое обеспечение гарантированности решения метрологических задач вероятностно-статистическими методами // Измерительная техника. 1988. № 12. С. 5–8 [Levin S. F., Blinov A. P., *Measurement Techniques*, 1988, vol. 31, no. 12, pp. 1145–1150. <https://doi.org/10.1007/BF00862607>].
36. Левин С. Ф., Лисенков А. Н., Сенько О. В., Харатьян Е. И. Система метрологического сопровождения статических измерительных задач «ММК-стат М». Руководство пользователя. М.: Госстандарт РФ, Вычислительный Центр РАН, 1998. 32 с. [Levin S. F., Lisenkov A. N., Sen'ko O. V., Xarat'yan E. I., *Sistema metrologicheskogo soprovozhdeniya staticheskix izmeritel'ny'x zadach "MMK-stat M". Rukovodstvo pol'zovatelya*, Moscow, Gosstandart RF, VC RAN Publ., 1998, 32 p. (In Russ.)].
37. Пружинская М. В. Сверхновые звезды, гамма-всплески и ускоренное расширение Вселенной: дисс. канд. физ.-мат. наук (Москва, МГУ им. М. В. Ломоносова, 2014) [Pruzinskaya M. V., *Candidate dissertation Mathematics and Physics*, Moscow, M. V. Lomonosov Moscow State University, 2014].
38. Левин С. Ф. Метод максимума компактности и комплексные измерительные задачи // Измерительная техника. 1995. № 7. С. 15–21 [Levin S. F., *Measurement Techniques*, 1995, vol. 38, no. 7, pp. 732–743. <https://doi.org/10.1007/BF02616256>].
39. Сажин М. В. Анизотропия и поляризация реликтового излучения. Последние данные // Успехи физических наук. 2004. Т. 174. С. 197–205. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0174.200402g.0197> [Sazhin M. V., *Anisotropy and polarization of cosmic microwave background: state of the art, UFN*, 2004, vol. 174, no. 2, pp. 197–205].
40. Arp H. C., *Quasars, Red shifts and Controversies*, Interstellar Media, Cambridge University Press, 1987, 208 p.
41. Левин С. Ф. Измерительные задачи калибровки средства измерений для заданных условий // Измерительная техника. 2021. № 4. С. 9–15. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-4-9-15> [Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 4, pp. 273–281. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01929-x>].
42. Левин С. Ф. Метрологическая аттестация математических моделей в измерительных задачах гравитации и космологии // Теоретические и экспериментальные проблемы общей теории относительности и гравитации // Тезисы докладов X-й РГК. М.: РГО, 1999. С. 245 [Levin S. F., *Abstracts of Papers Conference X-j RGK*, Moscow, RGO Publ., 1999, p. 245 (In Russ.)].
43. Kogut A. et al., *Astrophysical Journal*, 1993, vol. 419, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1086/173453>
44. Cruz M., Cayón L., Martínez-González E., Vielva P., Jin J., *Astrophysical Journal*, 2007, vol. 655, no. 1, 11. <https://doi.org/10.1086/509703>
45. Смут Дж. Ф. Анизотропия реликтового излучения: открытие и научное значение // УФН. 2007. Том 177, № 12. С. 1294–1317. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200712d.1294> [Smoot J. F., *Nobel lecture*, Stockholm, December 8, 2006].

46. Wilkinson D. T., Partridge R. B., Large-scale density non-homogeneities in the Universe, *Nature*, 1967, vol. 215, p. 719.
47. Бербидж Дж., Бербидж М. Квазары. Пер. с англ. В. И. Слыша и Г. Б. Шоломицкого. Под ред. Н. С. Кардашева. М.: Мир, 1969. 240 с. [Burbidge G., Burbidge M., *Quasi-stellar Objects*, San Francisco, London, W.H. Freeman and Company, 1967].
48. Idit Z., Riess A. G., Kirshner R. P., Dekel A., *Astrophysical Journal*, 1998, vol. 503(2), p. 483.
<https://doi.org/10.1086/306015>
49. Conley A. et al., *Astrophysical Journal*, 2007, vol. 664, no. 1, L13–L16. <https://doi.org/10.1086/520625>
50. Moss A. et al., *Physical Review*, 2010, vol. 83, no. 10. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.103515>
51. Szapudi I. et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, vol. 450, pp. 288–294. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv488>
52. Kovacs A. et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, vol. 510, iss. 1, pp. 216–229.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stab3309>

Статья поступила в редакцию 07.07.2022; одобрена после рецензирования 19.08.2022; принята к публикации 30.08.2022.
The article was submitted 07.07.2022; approved after reviewing 19.08.2022; accepted for publication 30.08.2022.

Измерительная система на основе нерекурсивных фильтров с оптимальной коррекцией погрешности динамического измерения

Андрей Сергеевич Волосников

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия, volosnikovas@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5579-6040>

Аннотация. Дан обзор публикаций по теории динамических измерений. Рассмотрена проблема минимизации погрешности динамического измерения, составляющие которой обусловлены динамическими свойствами (инерционностью) датчика и аддитивным шумом на его выходе. Для решения проблемы предложен способ минимизации погрешности динамического измерения в результате одновременной коррекции указанных составляющих и разработана структура измерительной системы. Применение измерительной системы позволяет оценивать погрешность динамического измерения и уменьшать её путём одновременного восстановления и фильтрации входного измеряемого сигнала датчика. Предложена структура специального фильтра с предварительной коррекцией передаточной функции датчика для дальнейшей обработки измеренного сигнала. Обработка погрешности динамического измерения заключается в итеративном применении восстанавливающего фильтра с конечно-импульсной характеристикой (или нерекурсивного фильтра) и оценке динамической погрешности. Для датчика 2-го порядка проведено компьютерное моделирование разработанной измерительной системы. Получены оптимальные (по минимуму оценки динамической погрешности) значения порядка восстанавливающего фильтра для входных сигналов различного вида в присутствии аддитивного гауссова шума на выходе датчика. Продемонстрировано уменьшение динамической погрешности с применением разработанной измерительной системы. Полученные результаты будут полезны при измерениях параметров быстропеременных процессов, когда доминирующей является динамическая составляющая погрешности, обусловленная динамическими свойствами (инерционностью) датчика, а также аддитивными шумами на его выходе.

Ключевые слова: датчик, динамическое измерение, оптимальная обработка сигналов, рекурсивные фильтры с конечно-импульсной характеристикой, погрешность динамического измерения

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Челябинской области в рамках регионального проекта фундаментальных и прикладных научных исследований № 20-48-740022 р_а_Челябинск «Методы регуляризации при обработке зашумленных данных в многоканальных измерительных системах».

Для цитирования: Волосников А. С. Измерительная система на основе нерекурсивных фильтров с оптимальной коррекцией погрешности динамического измерения // Измерительная техника. 2022. № 10. С. 19–25. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-19-25>

Measuring system on a basis of non-recursive filters with optimal dynamic error correction

Andrei S. Volosnikov

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia, volosnikovas@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5579-6040>

Abstract. The problem of the dynamic measurement error estimation and compensation is considered. This type of error is determined by two components. The first one is due to dynamic properties (inertia) of a sensor. The second one is due to the presence of an additive noise at the sensor output. The dynamic error reduction consists in simultaneous correction of these two components. The structure of the measuring system with the dynamic measurement error estimation is developed. Correction of the dynamic error is carried out by simultaneous restoration and filtering of the measured sensor input signal. The structure of a special filter with a preliminary correction of the sensor transfer function to a form convenient for further processing of the measured signal is proposed. Further signal processing consists in the iterative application of a restoring FIR filter with the dynamic error estimation. A computer simulation of the proposed measuring system for the second-order sensor was carried out. Optimal (in the sense of minimization of the dynamic error estimation) orders of the restoring filter are obtained for input signals of various types in the presence of an additive Gaussian noise at the sensor output. A decrease in the dynamic error estimation based on the proposed structure of the dynamic measuring system is demonstrated. The application field of the results obtained is the measurement of fast-changing processes, when the dynamic component of the error, caused by dynamic properties (inertia) of the sensor, as well as additive noises at its output, is dominant.

Keywords: sensor, dynamic measurement, optimal signal processing, finite impulse response filters, dynamic measurement error

Financial Support: the work was supported by the Ministry of Education and Science of the Chelyabinsk region within the framework of the regional project of fundamental and applied scientific research no. 20-48-740022 r_a_chelyabinsk "Regularization methods for processing noisy data in multichannel measuring systems".

Введение. Динамическое измерение – измерение, при котором средства измерений используются в динамическом режиме, связанном с изменениями условий (факторов) за время измерительного эксперимента (РМГ 29-2013¹). Данные изменения влияют на результат измерения (оценку измеряемой величины), в том числе при изменении измеряемой величины за время измерения. Специфика динамического измерения заключается в том, что оно характеризуется двумя составляющими погрешности, обусловленными инерционностью первичного измерительного преобразователя и шумами измерений. В теории динамических измерений повышение точности измерений заключается в восстановлении измеряемого сигнала, динамически искажённого средством измерений (датчиком), и анализ (оценивание) погрешности динамических измерений.

Цель исследования – разработка измерительной системы, позволяющей оценивать погрешность динамического измерения и уменьшать эту погрешность путём коррекции динамических характеристик датчика и оптимальной фильтрации шума измерения.

Обзор методов компенсации погрешности динамических измерений. Проведённый автором настоящей статьи анализ публикаций по теории динамических измерений показывает достаточно высокий интерес исследователей в мире к проблеме компенсации погрешности (неопределённости) измерений, обусловленной инерционностью измерительного преобразователя (датчика) и аддитивными шумами на его выходе.

В работах [1–3] рассмотрены методы восстановления сигналов линейных непрерывных стационарных измерительных систем. Для решения этой задачи синтезируется цифровой корректирующий фильтр, при этом требуется параметрическая идентификация (калибровка) измерительной системы. Приведены возможные способы оценки неопределённости динамических измерений во временной и частотной областях.

В [4, 5] для решения обратной задачи динамики применяется развёртка (деконволюция) зашумлённых сигналов на основе калмановской фильтрации. При этом для настройки параметров фильтра использована дополнительная информация о спектральной плотности мощности измеряемого сигнала.

Методы регуляризации решения некорректно поставленных задач с использованием вейвлет-преобразования описаны в [6–9]. Эти методы основаны на решении интегрального уравнения свёртки в частотной области, где в качестве регуляризирующего оператора служат узкополосные вейвлеты.

В [10–14] представлена математическая модель динамической погрешности инерционных компонент движущихся объектов, структурная схема измерительной системы для определения параметров судов с дополнительным каналом коррекции динамической погрешности и алгоритм повышения динамической точности данной измерительной системы, основанный на фильтре Калмана.

В [15, 16] разработана общая вероятностная модель как для статических, так и для динамических измерений.

В исследовании [16] рассмотрены вероятностные модели динамических измерений двух видов – прямого, когда целью является оценка параметров измеряемого сигнала непосредственно во время измерения, и косвенного, в котором параметры сигнала оцениваются после глубокой математической обработки выходных сигналов датчика методами спектрального анализа. В вероятностной модели динамического измерения обратная функция преобразования заменена на условный закон распределения вероятности выходного сигнала датчика. Сигнал восстанавливается с применением преобразования Байеса-Лапласа.

В [17] рассмотрен метод коррекции динамической погрешности термометра атмосферных измерений, используемый в зонде Гюйгенса миссии Кассини. Термометр составлен из двух независимых платиновых терморезисторов с различными динамическими свойствами. Результат исследования получен на основе быстрого фурье-преобразования выходных сигналов обоих датчиков. Дальнейшее преобразование построено на модели датчика, описываемой дифференциальным уравнением первого порядка, и модели корректирующего звена, полученного комбинацией двух характеристических уравнений теплового баланса датчиков.

Подход, основанный на применении методов теории автоматического управления для синтеза высокоточных динамических измерительных систем, описан в работах профессора А. Л. Шестакова [18–20], создателя и руководителя научной школы по теории динамических измерений Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета). В работах его учеников [21–25] рассмотрены способы восстановления динамически искажённых сигналов измерительных систем, основанные на классических и современных методах теории автоматического управления.

Постановка задачи исследования. Рассмотрим модель датчика в виде линейной стационарной системы, описываемой передаточной функцией вида

$$W_d(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = K_0 \frac{\prod_{i=1}^k (T_{2i}^2 p^2 + 2\zeta_{2i} T_{2i} p + 1) \prod_{i=k+1}^m (T_{2i} p + 1)}{\prod_{j=1}^l (T_{1j}^2 p^2 + 2\zeta_{1j} T_{1j} p + 1) \prod_{j=q+1}^n (T_{1j} p + 1)}, \quad (1)$$

где $U(p)$, $Y(p)$ – изображения по Лапласу входного и выходного сигналов датчика; p – комплексная переменная (частота); K_0 – статический коэффициент усиления; T_{1j} , T_{2i} и ζ_{1j} , ζ_{2i} – соответственно постоянные времени и коэффициенты демпфирования, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$ ($m \leq n$).

Порядок передаточной функции датчика определим как разность порядков знаменателя и числителя (1):

$$h = (2l + n) - (2k + m) = 2(l - k) + (n - m).$$

Схема преобразования входного измеряемого сигнала датчика $U(p)$ в выходной измеренный сигнал датчика $Y_d(p)$

¹ РМГ 29-2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.

приведена на рис. 1. При этом измеренный сигнал $Y_d(p)$ содержит выходной сигнал $Y(p)$ и аддитивный шум $V(p)$. Запишем сигнал погрешности динамического измерения в соответствии с рис. 1:

$$\begin{aligned} E(p) &= Y_d(p) - U(p) = [Y(p) + V(p)] - U(p) = \\ &= Y(p) - U(p) + V(p) = E_d(p) + V(p), \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} E_d(p) &= Y(p) - U(p) = U(p)W_d(p) - U(p) = \\ &= U(p)[W_d(p) - 1]. \end{aligned} \quad (3)$$

Погрешность (2) определяется двумя составляющими: первая в соответствии с (3) обусловлена динамическими свойствами (инерционностью) датчика, вторая – аддитивным шумом на его выходе. Тогда уменьшение погрешности $E(p)$ заключается в одновременном корректировании этих двух составляющих.

Измерительная система с оценкой погрешности динамического измерения.

Предварительная коррекция динамической характеристики датчика. Сформируем на выходе схемы (см. рис. 1) блок предварительной коррекции передаточной функции датчика, описываемый функцией вида

$$\begin{aligned} W_k(p) &= W_d^{-1}(p)W_1^h(p) = \\ &= \frac{1}{K_0} \frac{\prod_{j=1}^l (T_{1j}^2 p^2 + 2\zeta_{1j} T_{1j} p + 1) \prod_{j=q+1}^n (T_{1j} p + 1)}{\prod_{i=1}^k (T_{2i}^2 p^2 + 2\zeta_{2i} T_{2i} p + 1) \prod_{i=k+1}^m (T_{2i} p + 1)} \frac{1}{(pT_1 + 1)^h}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} W_1(p) &= \frac{1}{pT_1 + 1}; \\ T_1 &= \max_{j=1 \dots 2l+n} (T_{1j}), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где h – количество одинаковых передаточных функций типа (5).

Выходной сигнал $Y_{д.к}$ блока предварительной коррекции запишем как

$$\begin{aligned} Y_{д.к}(p) &= Y_d(p)W_k(p) = [Y(p) + V(p)]W_k(p) = \\ &= [U(p)W_d(p) + V(p)]W_k(p) = \\ &= U(p)W_d(p)W_k(p) + V(p)W_k(p) = Y_k(p) + V_k(p); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_k(p) &= U(p)W_d(p)W_k(p) = \\ &= U(p)W_d(p)[W_d^{-1}(p)W_1^h(p)] = \\ &= U(p)[W_d(p)W_d^{-1}(p)]W_1^h(p) = \\ &= U(p)W_1^h(p) = U(p)(pT_1 + 1)^{-h}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$V_k(p) = V(p)W_k(p). \quad (7)$$

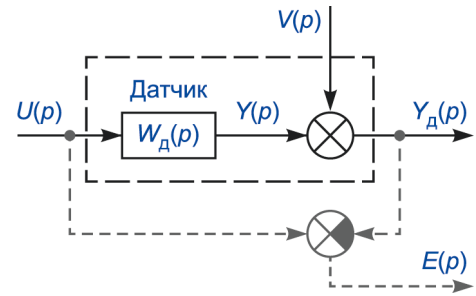


Рис. 1. Схема преобразования сигналов датчика

Fig. 1. Block diagram of a sensor signals conversion

Из (6), (7) следует, что преобразование выходного измеренного сигнала $Y_d(p) = Y(p) + V(p)$ в сигнал $Y_{д.к}(p) = Y_k(p) + V_k(p)$ в блоке предварительной коррекции передаточной функции датчика (4) эквивалентно преобразованию измеряемого сигнала $U(p)$ датчиком, описываемым передаточной функцией

$$W_{д.к}(p) = (pT_1 + 1)^{-h}. \quad (8)$$

Составляющая (3) погрешности уменьшена последовательной коррекцией динамических характеристик датчика (1), представленного в виде последовательности (8) из h одинаковых передаточных функций типа (5).

Коррекция погрешности динамического измерения.

Рассмотрим модели датчика и измерительной системы в дискретной форме для некоторого периода T квантования сигналов. Запишем дискретный аналог передаточной функции (5) 1-го порядка на основе z -преобразования

$$W_1(z) = (\alpha_1 z + \alpha_0)^{-1}, \quad (9)$$

где в соответствии с [26]:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= (1 - e^{-T/T_1})^{-1}; \\ \alpha_0 &= -e^{-T/T_1}(1 - e^{-T/T_1})^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Представим вектор значений импульсной характеристики восстанавливающего фильтра $W_b(z)$ в виде линейной дискретной свёртки вектора, состоящего из коэффициентов α , α_0 передаточной функции (9), с вектором значений импульсной характеристики некоторого нерекурсивного фильтра $W_\phi(z)$:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_b &= \mathbf{A}_1 * \mathbf{B}_\phi = [\alpha_1 \ \alpha_0] * [\beta_N \ \beta_{N-1} \ \beta_{N-2} \ \dots \ \beta_2 \ \beta_1 \ \beta_0] = \\ &= [\alpha_1 \beta_N \ \alpha_1 \beta_{N-1} + \alpha_0 \beta_N \ \alpha_1 \beta_{N-2} + \alpha_0 \beta_{N-1} \ \dots \\ &\dots \ \alpha_1 \beta_1 + \alpha_0 \beta_2 \ \alpha_1 \beta_0 + \alpha_0 \beta_1 \ \alpha_0 \beta_0], \end{aligned} \quad (11)$$

где $\mathbf{A}_1 = [\alpha_1 \ \alpha_0]$; $\mathbf{B}_\phi = [\beta_N \ \beta_{N-1} \ \beta_{N-2} \ \beta_2 \ \beta_1 \ \beta_0]$ – векторы значений импульсной переходной функции нерекурсивного фильтра $W_\phi(z)$; N – порядок фильтра; $*$ – оператор линейной дискретной свёртки, $i = N, N-1, \dots, 2, 1$.

Свёртка (11) коэффициентов (10) с импульсной характеристикой нерекурсивного фильтра $W_\Phi(z)$ обеспечивает принципиальную устойчивость корректирующего устройства измерительной системы из-за отсутствия в таком фильтре обратных связей.

Для обеспечения линейности фазовой характеристики нерекурсивного фильтра зададим условие симметричности его импульсной характеристики

$$\beta_i = \beta_{N-i}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N. \quad (12)$$

Условие (12) также обеспечивает постоянство групповой задержки фильтра $d = TN/2$.

В результате свёртки (11) определены коэффициенты передаточной функции восстанавливающего фильтра $W_B(z)$ порядка $N+1$. Этот фильтр одновременно корректирует

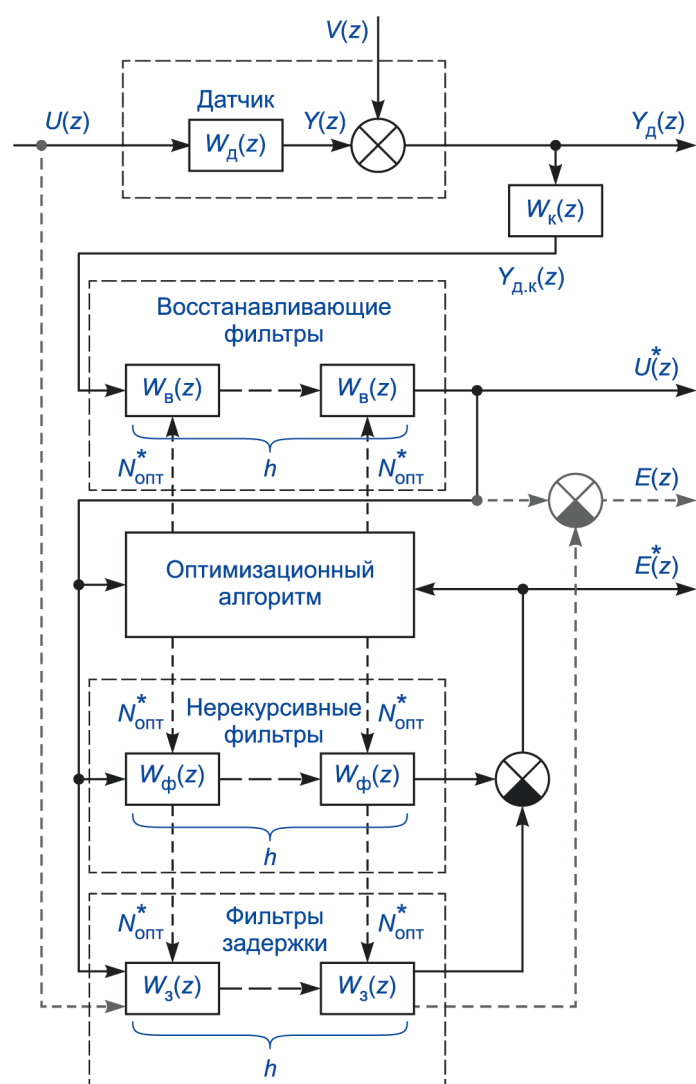


Рис. 2. Схема измерительной системы с оценкой и коррекцией погрешности динамического измерения

Fig. 2. Block diagram of the measuring system with dynamic error estimation and correction

первую составляющую (3) погрешности динамического измерения путём восстановления измеряемого сигнала и вторую составляющую – фильтрацией аддитивного шума на выходе датчика.

Схема измерительной системы с коррекцией погрешности динамического измерения приведена на рис. 2. Последовательность идентичных восстанавливающих фильтров $W_B(z)$ корректирует погрешность датчика, описываемого передаточной функцией (8). Данная функция получена в результате обработки измеренного сигнала $Y_d(z)$ в блоке предварительной коррекции передаточной функции (4) датчика. Таким образом, в измерительной системе одновременное восстановление и фильтрация входного измеряемого сигнала датчика $U^*(z)$ реализовано за счёт последовательной обработки выходного измеренного сигнала с помощью корректирующего фильтра и применения последовательности восстанавливающих фильтров. Это позволило уменьшить погрешность динамического измерения. Однако основной задачей при использовании измерительной системы, представленной на рис. 2, является оценивание и минимизация погрешности по критерию адаптивности измерительной системы к аддитивным шумам на выходе датчика. Эта адаптивность достигается подбором оптимального (с точки зрения минимума среднеквадратической оценки погрешности) порядка N нерекурсивного фильтра.

Оценивание погрешности динамического измерения.

Сигнал оценки динамической погрешности измерения $E^*(z)$ в измерительной системе сформируем в соответствии со схемой системы, приведённой на рис. 2. Передаточная функция нерекурсивного фильтра в структуре измерительной системы имеет вид

$$W_\Phi(z) = \beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_{N-1} z^{-N+1} + \beta_N z^{-N} = \sum_{i=0}^N \beta_i z^{-i}, \quad (13)$$

где коэффициенты β_i распределены в соответствии с условием (12).

Сигнал оценки погрешности запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} E^*(z) &= U^*(z)W_\Phi(z) - U^*(z)W_3(z) = \\ &= U^*(z)[W_\Phi(z) - W_3(z)]; \end{aligned} \quad (14)$$

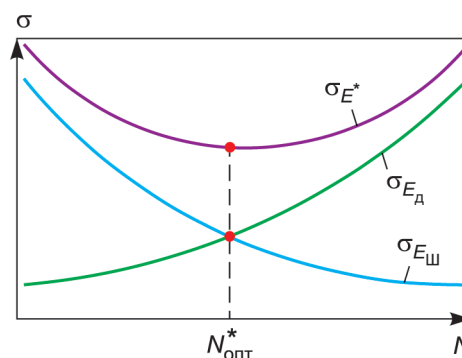


Рис. 3. Зависимости СКО σ оценки динамической погрешности от порядка нерекурсивного фильтра

Fig. 3. Standard deviation σ of the dynamic error estimation depending on the non-recursive filter order

$$W_3(z) = z^{-N/2}, \quad (15)$$

где $W_3(z)$ – передаточная функция фильтра фазовой задержки.

Выражение (14) аналогично выражению (3), но учтено, что фильтр (15) используется для компенсации групповой задержки, вносимой в восстановленный сигнал $U^*(z)$ нерекурсивным фильтром $W_\phi(z)$ в структуре восстанавливающего фильтра $W_B(z)$.

Сигнал истинного значения динамической погрешности с компенсацией постоянной фазовой задержки, вносимой восстанавливающим нерекурсивным фильтром $W_\phi(z)$, определится следующим образом:

$$E(z) = U^*(z) - U(z)W_3(z). \quad (16)$$

При этом заметим, что сигнал истинного значения погрешности на практике не доступен наблюдению, поскольку также не доступен прямому наблюдению и измеряемый сигнал $U(t)$.

Рассмотрим оптимизационный алгоритм, представленный в виде блока измерительной системы (см. рис. 2). Среднее квадратическое отклонение (СКО) оценки погрешности определим в стандартном виде

$$\sigma_{E^*} = \sqrt{\sum_{i=0}^M (E^*(iT) - \overline{E^*})^2 M^{-1}}, \quad (17)$$

где M – количество наблюдений измеренного сигнала с периодом дискретизации T ; E^* – среднее значение наблюдений сигнала оценки погрешности,

$$\overline{E^*} = (M+1)^{-1} \sum_{i=0}^M E^*(iT). \quad (18)$$

Числовое значение СКО (17) определяется порядком N нерекурсивного фильтра (13) с импульсной характеристикой заданного вида. При $N \rightarrow 0$ в восстановленном сигнале $U^*(z)$ будет значительно усиливаться аддитивная шумовая составляющая выходного измеренного сигнала датчика, а также и соответствующая составляющая погрешности $\sigma_{E_{ш}}$. При $N \rightarrow \infty$ аддитивная шумовая составляющая в результате фильтрации будет уменьшаться. Однако в этом случае будет значительно увеличиваться составляющая σ_{E_d} погрешности (3), обусловленная динамическими свойствами (инерционностью) датчика.

Таким образом, существует некоторое оптимальное значение порядка нерекурсивного фильтра $N_{\text{опт}}$ (рис. 3), при котором минимизируется СКО оценки погрешности (17). Критерием адаптивной настройки параметров нерекурсивного фильтра $W_\phi(z)$, а значит и восстанавливающего фильтра $W_B(z)$, в структуре которого содержится обратная модель датчика и нерекурсивный фильтр $W_\phi(z)$, является минимум СКО оценки погрешности.

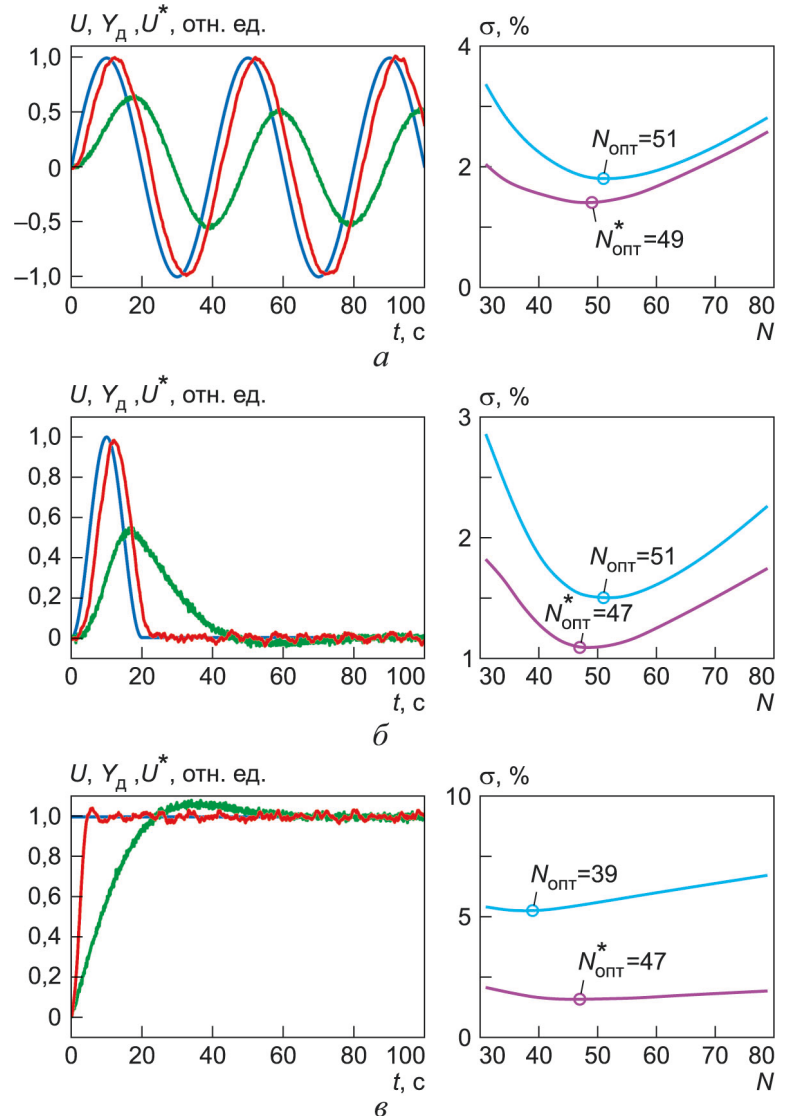


Рис. 4. Графики гармонического (а), импульсного (б) и ступенчатого (в) сигналов измерительной системы при случайном гауссовом шуме на выходе датчика и СКО σ оценок погрешности динамического измерения:

U —; U^* —; Y_d —; σ_{E^*} —; σ_{E^*} —

Fig. 4. Graphs of harmonic (a), impulse (b) and step (c) signals of the measuring system with random Gaussian noise at the sensor output and standard deviation σ of the dynamic error:

U —; U^* —; Y_s —; σ_E —; σ_{E^*} —

Компьютерное моделирование измерительной системы.

Для датчика 2-го порядка проведено компьютерное моделирование измерительной системы (см. рис. 2). В качестве типовых входных воздействий использованы гармонический, импульсный и ступенчатые сигналы единичной амплитуды. На выходе датчика присутствуют аддитивный случайный, гауссово распределенный шум с СКО, равным 1 % амплитуды сигнала.

Рассмотрим датчик с передаточной функцией вида

$$W_d(p) = \frac{T_{21}p + 1}{T_{11}^2 p^2 + 2\zeta_{11}T_{11}p + 1},$$

где $T_{11} = 10$ с; $T_{12} = 6$ с; $\zeta_{11} = 0,7$.

Для данного случая $h=1$ и передаточную функцию блока предварительной коррекции (4) запишем как

$$W_k(p) = W_d^{-1}(p)W_1(p) = \frac{T_{11}^2 p^2 + 2\zeta_{11}T_{11}p + 1}{(T_{21}p + 1)(T_1p + 1)}, \quad T_1 = T_{11}.$$

Для периода дискретизации $T=0,1$ с коэффициенты дискретной передаточной функции (9) в соответствии с (10): $\alpha_1=100,5$; $\alpha_0=99,5$. В качестве рекурсивного фильтра при восстановлении и фильтрации входного измеряемого сигнала и оценке погрешности применим фильтр с импульсной характеристикой в виде полупериода косинусоиды. Графики сигналов измерительной системы во временной области и СКО оценки погрешности динамического измерения (СКО $\sigma_E(N)$ истинного значения погрешности и СКО $\sigma_{E^*}(N)$ оценки погрешности (17) в зависимости от порядка нерекурсивного фильтра (13)) приведены на рис. 4.

В процессе моделирования измерительной системы (см. рис. 2) предложенная оценка погрешности сравнивается с истинным значением погрешности, не доступным прямому наблюдению. СКО σ_E истинного значения погрешности динамического измерения оценивается аналогично (17), (18) с учётом (16). На рис. 4 отмечены оптимальные значения $N_{\text{опт}}$, $N_{\text{опт}}^*$ порядка нерекурсивного фильтра, которые соответствуют минимумам истинного значения и оценки погрешности динамического измерения.

Анализ результатов. Из анализа полученных результатов компьютерного моделирования можно сделать следующие выводы:

при обработке выходного измеренного сигнала датчика происходит восстановление формы и амплитуды сигнала;

в процессе восстановления фильтруется аддитивный шум на выходе датчика, при этом уменьшается соответствующая составляющая погрешности динамического измерения;

процесс восстановления входного сигнала датчика является оптимальным по минимуму оценки погрешности динамического измерения для нерекурсивного фильтра данного типа;

наблюдаются близость графиков СКО истинного значения и предложенной в работе оценки погрешности и, соответственно, близость оптимальных значений порядка нерекурсивного фильтра, полученных при минимизации истинного и оценочного значений погрешности динамического измерения;

измерительная система устойчива, поскольку при обработке сигналов используются нерекурсивные фильтры;

применение блока предварительной коррекции передаточной функции датчика упрощает рассматриваемую задачу восстановления входного измеряемого сигнала путём редукции системы к модели первого порядка.

Заключение. Коррекция погрешности динамического измерения проведена путём одновременного восстановления и фильтрации входного измеряемого сигнала датчика с помощью восстанавливающего нерекурсивного фильтра, а критерием оптимальной настройки параметров фильтра служит минимум оценки погрешности динамического измерения.

В процессе компьютерного моделирования предложенной измерительной системы с оценкой погрешности динамического измерения получены оптимальные (по минимуму оценки погрешности) значения порядка восстанавливающего нерекурсивного фильтра для входных сигналов различного вида при аддитивном случайном шуме на выходе датчика 2-го порядка и показана эффективность оценки погрешности с применением предложенной измерительной системы.

Необходимо отметить, что рассмотренная модель измерительной системы с оценкой погрешности и подход к оценке и коррекции погрешности динамического измерения направлены на пост-обработку измеренного сигнала датчика. Поэтому направлением следующего этапа исследования станет модификация предложенного подхода для адаптивной обработки сигнала непосредственно в процессе динамического измерения.

Список источников / References

1. Hessling J. P., *Measurement Science and Technology*, 2008, vol. 19(7), 075101.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/7/075101>
2. Hessling J. P., *Measurement Science and Technology*, 2008, vol. 19(8), 084008.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/8/084008>
3. Hessling J. P., *Measurement Science and Technology*, 2009, vol. 20(5), 055106.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/5/055106>
4. Kollar I., Osvath P., Zaengl W. S., *Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Cambridge, MA, USA, June 5–8, 1988, pp. 359–363.
<https://doi.org/10.1109/ELINSL.1988.13941>
5. Vester R., Percin M., and van Oudheusden B., *Measurement Science and Technology*, 2016, vol. 27(9), 095302.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/9/095302>
6. Neelamani R., Choi H., Baraniuk R., *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, vol. 52(2), pp. 418–433.
<https://doi.org/10.1109/TSP.2003.821103>
7. Shen X. A., Walter G. G., *Numerical Functional Analysis and Optimization*, 2002, vol. 23(1-2), pp. 195–215.
<https://doi.org/10.1081/NFA-120003678>
8. Fan J., Koo J.-Y., *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, vol. 48(3), pp. 734–747.
<https://doi.org/10.1109/18.986021>
9. Qian, A., *Applied Mathematics and Computation*, 2008, vol. 203(2), pp. 635–640. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2008.05.009>
10. Dichev D., Koev H., Bakalova T., Louda P., *Measurement Science Review*, 2014, vol. 14(4), pp. 183–189.
<https://doi.org/10.2478/msr-2014-0025>
11. Dichev D., Koev H., Bakalova T., Louda P., *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, vol. 44(1), pp. 3–20.
<https://doi.org/10.2478/jtam-2014-0001>
12. Dichev D., Koev H., Bakalova T., Louda P., *Measurement Science Review*, 2015, vol. 15(1), pp. 19–26.
<https://doi.org/10.1515/msr-2015-0004>

13. Dichev D., Koev H., Bakalova T., Louda P., *Metrology and Measurement Systems*, 2016, vol. 23(4), pp. 555–565.
<https://doi.org/10.1515/mms-2016-0041>
14. Dichev D., Zhelezarov I., Diakov D., Nikolova H., Miteva R., *2019 XXIX International Scientific Symposium "Metrology and Metrology Assurance" (MMA) Proceedings*, Sozopol, Bulgaria, Sept. 6–9, 2019, pp. 01–04.
<https://doi.org/10.1109/MMA.2019.8936039>
15. Rossi G. B., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, vol. 61(8), pp. 2097–2106.
<https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2197071>
16. Rossi G. B., *2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, Pisa, Italy, May 11–14, 2015, pp. 1516–1521.
<https://doi.org/10.1109/I2MTC.2015.7151503>
17. Saggin B., Debei S., Zaccariotto M., *Measurement*, 2001, vol. 30(3), pp. 223–230.
[https://doi.org/10.1016/S0263-2241\(01\)00015-X](https://doi.org/10.1016/S0263-2241(01)00015-X)
18. Shestakov A. L., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1996, vol. 45(1), pp. 250–255.
<https://doi.org/10.1109/19.481342>
19. Shestakov A. L., *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing X, Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences*, 2015, vol. 86, pp. 66–77.
https://doi.org/10.1142/9789814678629_0008
20. Shestakov A. L., *ACTA IMEKO*, 2019, vol. 8(1), pp. 64–76.
https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v8i1.568
21. Yurasova E. V., Biziaev M. N., Volosnikov A. S., *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 764–769.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.101>
22. Yurasova E. V., Bizyaev M. N., Volosnikov A. S., *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2015, vol. 16(1), pp. 64–80. <https://doi.org/10.14529/ctcr160106>
23. Volosnikov A. S., Shestakov A. L., *ACTA IMEKO*, 2016, vol. 5(3), pp. 24–31. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v5i3.294
24. Bizyaev M. N., Volosnikov A. S., *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XI, Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences*, 2018, vol. 89, pp. 153–161.
https://doi.org/https://doi.org/10.1142/9789813274303_0012
25. Yurasova E. V., Volosnikov A. S., *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XI, Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences*, 2018, vol. 89, pp. 427–438. https://doi.org/10.1142/9789813274303_0043
26. Franklin G. F., Powell J. D., Workman M. L., *Digital Control of Dynamic Systems (3rd Edition)*, Addison-Wesley, 1998, 742 p.

Статья поступила в редакцию 19.05.2022; одобрена после рецензирования 26.08.2022; принята к публикации 30.08.2022.
The article was submitted 19.05.2022; approved after reviewing 26.08.2022; accepted for publication 30.08.2022.

Эталонная установка для воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения единицы показателя преломления твёрдых веществ

Геннадий Николаевич Вишняков¹, Владимир Леонидович Минаев², Светлана Сергеевна Бочкарева³✉

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

^{1, 2} Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 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. Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения средств измерений двумерного пространственного распределения (профиля) единицы показателя преломления твёрдых веществ. Разработана эталонная установка, которая включена в состав Государственного первичного эталона единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021. Представлены состав, принцип работы и основные метрологические характеристики эталонной установки, основу которой составляет цифровой интерферометр для измерения двумерного пространственного распределения (профиля) показателя преломления тонких срезов заготовок градиентных стекловолокон. Эталонная установка из состава ГЭТ 138-2021 обеспечивает единство измерений для средств измерений профиля показателя преломления, так называемых оптических анализаторов заготовок градиентных стекловолокон и оптических волокон. Приведены результаты экспериментальных исследований ГЭТ 138-2021 в части воспроизведения двумерного пространственного распределения единицы показателя преломления.

Ключевые слова: государственный первичный эталон, стекловолокно, заготовка стекловолокон, профиль показателя преломления, цифровой интерферометр

Благодарности: за изготовление тонких срезов заготовок градиентного волокна авторы выражают благодарность научному сотруднику Лаборатории специального стекла ООО НТО «ИРЭ-Полус» (Московская обл., г. Фрязино) В. С. Брунову.

Для цитирования: Вишняков Г. Н., Минаев В. Л., Бочкарева С. С. Эталонная установка для воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения единицы показателя преломления твёрдых веществ // Измерительная техника. 2022. № 10. С. 26–30.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-26-30>

Reference system for observation, storing and transmitting a two-dimensional spatial distribution (profile) of solids refractive index unit

Gennady N. Vishnyakov¹, Vladimir L. Minaev², Svetlana S. Bochkareva³✉

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

^{1, 2} 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. The issues of metrological support of measuring instruments of two-dimensional spatial distribution (profile) of the refractive index unit of solid substances are considered. A reference setup has been developed, which is included in the State primary standard of the refractive index unit GET 138-2021. The composition, principle of operation, and main metrological characteristics of the reference setup, which is based on a digital interferometer for measuring the two-dimensional spatial distribution (profile) of the refractive index of thin sections of preforms of graded glass fibers, are presented. The reference setup from GET 138-2021 for the first time ensures the uniformity of measurements for measuring instruments for the refractive index profile, the so-called optical analyzers of preforms and the fiber itself, which are used in the production of optical glass fibers. The results of experimental studies of GET 138-2021 in terms of reproducing the two-dimensional spatial distribution of a refractive index unit are presented.

Keywords: state primary standard, glass fiber, fiber preform, refractive index profile, digital interferometer

Acknowledgments: the authors express gratitude to V. S. Brunov, scientific researcher at the Special Glass Laboratory of IRE-Polyus (Moscow region, Fryazino), for fabricating thin sections of gradient fiber preforms.

Введение. До настоящего времени не было обеспечено единство измерений для средств измерений двумерного пространственного распределения (профиля) показателя преломления твёрдых тел, в первую очередь заготовок градиентных стекловолокон и самих стекловолокон.

Проблема измерения профиля показателя преломления наиболее остро стоит при контроле качества изготовления оптического стекловолокна. Это связано с бурным развитием волоконно-оптических систем связи, а также с тем, что максимальная полоса пропускания волоконного световода достигается оптимизацией распределения показателя преломления по сердцевине волокна [1–3].

Важное измерение при производстве оптического волокна – определение профиля показателя преломления заготовки, из которой вытягивается волокно. Информация о профиле показателя преломления заготовки позволяет прогнозировать характеристики изготовленного из заготовки волокна. Результаты измерения профиля показателя преломления вытянутых волокон также важны, так как позволяют контролировать изменение световодных свойств стекловолокна в процессе вытягивания и сравнивать их с определёнными ранее свойствами заготовки.

Профиль показателя преломления обычно измеряют на цилиндрических заготовках-преформах, поскольку форма профиля показателя преломления после перетяжки в световод сохраняется с точностью до 0,1 %. Приборы для контроля профиля показателя преломления оптических волокон являются неотъемлемой частью технологических линий по их производству. Профиль показателя преломления определяет геометрические, волноводные и дисперсионные параметры световодов [4]. Чтобы эти параметры соответствовали международным стандартам, профиль показателя преломления необходимо контролировать с точностью 5–10 %.

В связи с этим к настоящему времени разработано большое количество разрушающих и неразрушающих методов измерения профиля показателя преломления оптических волокон и их заготовок [5–7]. Появились соответствующие средства измерений – оптические анализаторы заготовок волокна, например приборы серии P-102 (York-Technology, США), P104 Preform Analyzer (Photon Kinetics, США). Есть также отечественные аналоги: во Всесоюзном научно-исследовательском институте технической физики (РФЯЦ – ВНИИТФ, г. Снежинск) разработана модель контрольно-измерительного прибора ИПП-1 для измерения профиля показателя преломления заготовок [8].

После появления средств измерений профиля показателя преломления встала необходимость метрологического

обеспечения такого рода измерений. Например, в Национальной физической лаборатории (NPL, Англия), созданы два вида стандартных образцов волокна со ступенчатым профилем показателя преломления для калибровки анализаторов заготовок.

Поэтому в период 2018–2020 гг. во ВНИИОФИ проведена модернизация Государственного первичного эталона единицы показателя преломления ГЭТ 138-2010 в части обеспечения воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения единицы показателя преломления в диапазоне длин волн 0,4–1,55 мкм и утверждён Государственный первичный эталон единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021¹. Результаты исследования ГЭТ 138-2021 в части обеспечения воспроизведения, хранения и передачи единицы показателя преломления твёрдых и жидких веществ на разных длинах волн в диапазоне 0,4–1,55 мкм представлены в [9].

Цель настоящей работы состоит в описании состава, принципа работы и метрологических характеристик эталонной установки, предназначенной для воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения единицы показателя преломления.

Состав и описание эталонной установки для измерения двумерного пространственного распределения показателя преломления твёрдых веществ. Для воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения (профиля) показателя преломления твёрдых веществ в состав ГЭТ 138-2021 включена эталонная установка. Состав эталонной установки:

цифровой интерферометр для измерения двумерного пространственного распределения (профиля) показателя преломления твёрдых веществ;

эталонные меры двумерного пространственного распределения (профиля) показателя преломления в виде тонких срезов заготовок градиентного волокна и самих заготовок;

специализированное программное обеспечение WinPhast RU.КВФШ.00044-0112.

Основой эталонной установки служит цифровой интерферометр, собранный по схеме двухканального интерферометра Маха-Цандера². Для получения фазовых изображений объекта в интерферометре реализован метод дискретного фазового сдвига с помощью управляемого компьютером опорного зеркала, закреплённого на пьезоэлементе. Интерферограммы объекта, полученные при различных положениях опорного зеркала, регистрируются встроенной цифровой видеокамерой и поступают в персональный компьютер, где автоматически обрабатываются. В результате обработки восстанавливается

¹ Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 февраля 2021 года № 88 «Об утверждении Государственного первичного эталона единицы показателя преломления».

² Государственный первичный эталон единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021. URL: <https://www.vniiofi.ru/depart/m44/get138-2021.html?ysclid=16m0lw4ncs378676549> (дата обращения: 09.08.2022).

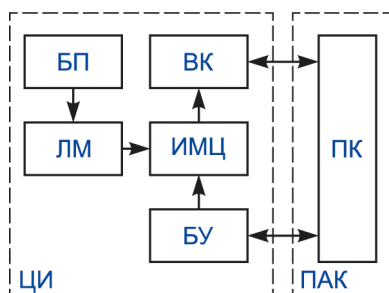


Рис. 1. Функциональная схема цифрового интерферометра:

ЦИ – цифровой интерферометр; БП – блок питания лазерных модулей; ЛМ – лазерный модуль; ВК – высокоразрешающая видеокамера; ИМЦ – интерферометр Маха-Цандера; БУ – блок управления пьезоэлементом; ПК – персональный компьютер; ПАК – программно-аппаратный комплекс

Fig. 1. Functional diagram of a digital interferometer:

DI – digital interferometer; *BP* – power supply unit for laser modules; *LM* – laser module; *VK* – high-resolution video camera; *IMZ* – Mach-Zehnder interferometer; *BU* – piezoelectric element control unit; *PC* – personal computer; *PAK* – software and hardware complex

тельными и полированными плоскостями. Для уменьшения относительного фазового набег исследуемый объект необходимо поместить в иммерсионную жидкость с показателем преломления близким по значению к показателю преломления на боковой поверхности заготовки волокна. Результаты измерений в виде двумерного распределения показателя преломления и графиков сечений отображаются на экране компьютера. Для управления вводом изображений, сдвигом пьезоэлемента и расшифровкой интерферограмм используется разработанное специализированное программное обеспечение WinPhast RU.КВФШ.00044-0112.

В цифровом интерферометре измеряется разность оптических длин пути $\Delta(x, y)$ излучения вдоль лучей, проходящих через срез и через иммерсионную жидкость. Искомое двумерное пространственное распределение (профиль) показателя преломления вычисляется по следующей формуле (уравнение измерений):

$$n(x, y) = \Delta(x, y)/d + n_{\text{NM}}, \quad (1)$$

где d – толщина среза; $n_{\text{им}}$ – показатель преломления иммерсионной жидкости.

Функциональная схема цифрового интерферометра представлена на рис. 1. Цифровой интерферометр включает в

двумерное распределение оптической разности хода. По измеренной разности хода с учётом толщины объекта вычисляется двумерное пространственное распределение (профиль) показателя преломления материала, из которого изготовлен объект.

В качестве материального носителя единицы двумерного пространственного распределения (профиля) показателя преломления используется тонкий срез (толщиной около 100 мкм) заготовки градиентного волокна, которая представляет собой стеклянный цилиндр. Заготовка имеет нелинейный градиент показателя преломления от оси цилиндра к боковой поверхности. Тонкий срез заготовки — диск с плоскопарал-

себя интерферометр Маха-Цандера, высокоразрешающую видеокамеру, лазерный модуль, блок питания лазерного модуля, блок управления пьезоэлементом. Программно-аппаратный комплекс на основе персонального компьютера содержит специализированное программное обеспечение WinPhast.

Результаты исследований. Метрологические характеристики эталонной установки из состава ГЭТ 138-2021 исследовали путём измерения на цифровом интерферометре двумерного профиля показателя преломления эталонной меры, выполненной в виде тонкого среза заготовки градиентного волокна. Предполагается, что профиль показателя преломления заготовки градиентного волокна совпадает с измеренным профилем показателя преломления тонкого среза того же градиентного волокна. Заготовка градиентного волокна используется в качестве эталонной меры пространственного распределения показателя преломления.

С помощью цифрового интерферометра измерено пространственное распределение показателя преломления тонкого среза толщиной 110 мкм заготовки градиентного волокна, изготовленного в Лаборатории специального стекла ООО НТО «ИРЭ-Полюс» (Московская обл., г. Фрязино).

Тонкий срез стекловолокон размещали между двух стеклянных пластин толщиной 1 мм, разделённых спейсером толщиной около 0,2 мм. Пространство между стеклянными пластинами заполняли маслом иммерсионным для микроскопии в соответствии с ГОСТ 13739-78³. Показатель преломления иммерсионного масла предварительно измеряли на рефрактометре Atago RX-9000α (Atago, Япония), а также на гониометре-спектрометре, входящем в состав ГЭТ 138-2021 с помощью поллой призмы на различных длинах волн. На длине волны излучения 633 нм показатель преломления масла составил 1,514126. В качестве исходной измеряемой величины получена двумерная карта оптической разности хода.

На основании 10 измерений по формуле (1) рассчитан двумерный профиль показателя преломления тонкого среза заготовки градиентного волокна на сетке 128×128 отсчётов для длины волны излучения 633 нм. Аналогичные измерения этого же среза с последующим расчётом двумерного профиля показателя преломления проведены на других длинах волн излучения 455; 850; 1550 нм (рис. 2). Результаты исследований показывают, что с увеличением длины волны значение показателя преломления в максимуме профиля уменьшается.

Измерение зависимости двумерного распределения показателя преломления от длины волны излучения очень важно в оптическом производстве. Такие критические показатели характеристик волокна, как дисперсия и модальная эффективная площадь, можно наиболее точно предсказать, зная спектральную зависимость профиля показателя преломления волокна. Поскольку большинство оптоволокон легированы сложной запатентованной смесью с несколькими видами добавок, которые могут оказывать неаддитивное влияние на показатель преломления волокна, в качестве производственного контроля можно

³ ГОСТ 13739-78. Масло иммерсионное для микроскопии. Технические требования. Методы испытаний.

Рис. 2. Результаты измерений тонкого среза заготовки градиентного волокна: полутоновое (а) и аксонометрическое псевдоцветное (б) изображения двумерного распределения показателя преломления на длине волны 633 нм; в – профили показателей преломления на различных длинах волн

Fig. 2. Results of measurements of the gradient fiber preform thin section: а – grayscale image of the two-dimensional distribution of the RI at a wavelength of 633 nm; б – axonometric pseudocolor image of the two-dimensional distribution of the RI at a wavelength of 633 nm; с – profiles of the RI at wavelengths of 455, 633, 850 and 1550 nm

применять метод анализа спектральной зависимости показателя преломления волокна [10].

Оценка бюджета неопределённости. Результаты экспериментальных исследований ГЭТ 138-2021 в части воспроизведения двумерного пространственного распределения единицы показателя преломления показали, что среднее квадратическое отклонение (СКО) результатов измерений показателя преломления в диапазоне 0,44–0,7 мкм не превышает $1,5 \cdot 10^{-4}$, а в диапазоне 0,7–1,55 мкм – не более $2,0 \cdot 10^{-4}$. Поэтому можно принять, что стандартная неопределённость по типу А будет равна этим же значениям.

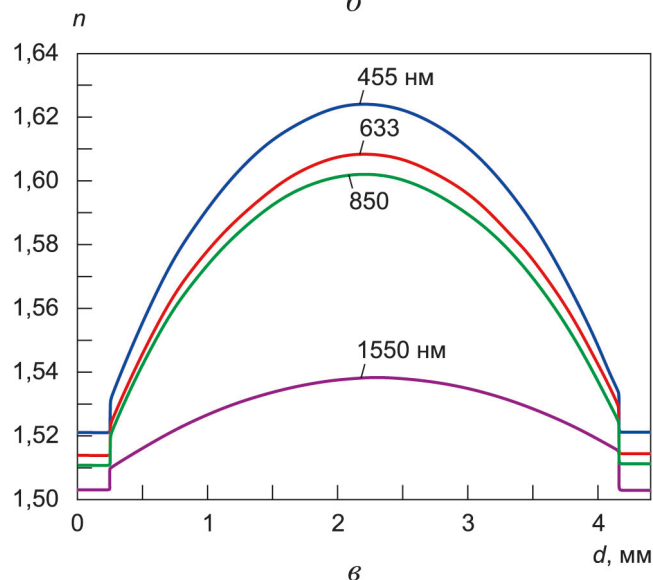
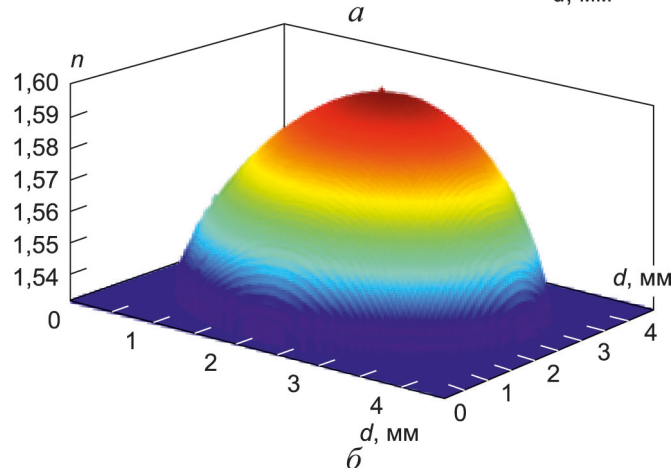
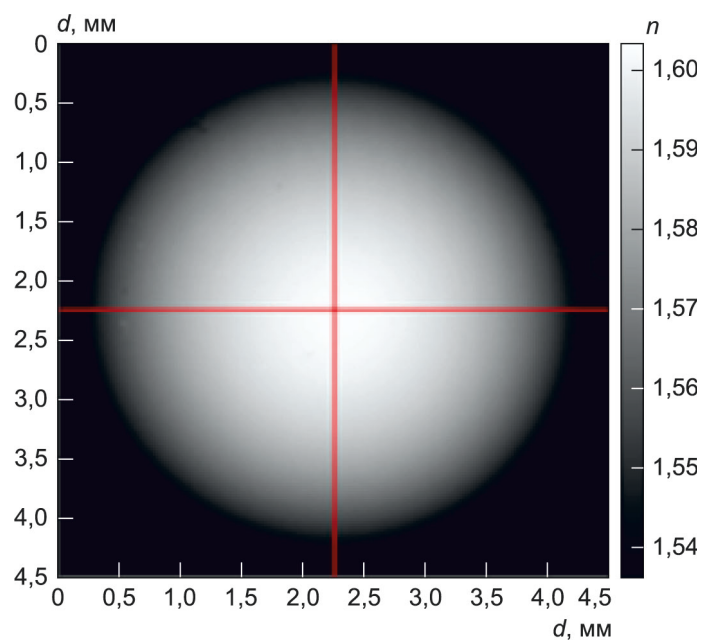
Исходя из уравнения измерений (1) вклад в расширенную неопределённость воспроизведения двумерного пространственного распределения показателя преломления вносят неопределённости измерений следующих величин: двумерной карты оптической разности хода $\Delta(x, y)$, показателя преломления иммерсионной жидкости $n_{\text{им}}$ и толщины среза d .

Для оценки бюджета неопределённости вычислим коэффициенты чувствительности путём дифференцирования выражения (1).

Двумерная карта оптической разности хода $\Delta(x, y)$ измеряется на цифровом интерферометре, метрологические характеристики которого определяются по точности измерений отклонений от плоскостности соответствующей супергладкой плоской меры. Предел допустимых отклонений от плоскостности не превышает 1/100 длины волны излучения. Следовательно, в диапазоне длин волн 0,44–0,7 мкм стандартную неопределённость по типу В измерений разности хода можно оценить в 0,01 мкм, а в диапазоне 0,7–1,55 мкм – 0,015 мкм.

Неопределённость измерения толщины среза оценивается как 0,5 мкм, а измерений показателя преломления иммерсионной жидкости 10^{-4} . Полученный бюджет неопределённости приведён в таблице, где НСП – неисключённая систематическая погрешность, k – коэффициент охвата, N – количество независимых измерений.

Таким образом, расчёт бюджета неопределённости показал, что стандартная суммарная неопределённость в диапазоне длин волн 0,44–0,7 мкм не превышает $2,5 \cdot 10^{-4}$, в диапазоне 0,7–1,55 мкм – $3,0 \cdot 10^{-4}$, а расширенная неопределённость в диапазоне длин волн 0,44–0,7 мкм не превышает $5,0 \cdot 10^{-4}$ и в диапазоне 0,7–1,55 мкм – $6,0 \cdot 10^{-4}$.



Закключение. ГЭТ 138-2021 возглавляет Государственную поверочную схем для средств измерений показателя преломления, а также воспроизводит, хранит и передает

Бюджет неопределённости при воспроизведении двумерного пространственного распределения показателя преломления в диапазоне 1,4–3,0

Неопределённость	Диапазон длин волн, нм	
	405–700	700–1550
СКО среднего арифметического результатов измерений ($N = 50$), не более	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
НСП, не более	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$
Стандартная неопределённость		
по типу А	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
по типу В	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$
суммарная	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$
Расширенная неопределённость ($k = 2$)	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$

двумерное пространственное распределение (профиль) единицы показателя преломления рабочим эталонам 1-го разряда в виде эталонных мер профиля показателя преломления и далее средствам измерений⁴.

Список источников

1. Иванова С. М., Елисеев О. В., Михайленко А. С., Студеникин О. Л. Обзор методов первичных параметров оптического волокна // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2008. № 51. С. 78–83.
2. Ding M., Fan D., Wang W., Luo Y., Peng G.-D., Basics of Optical Fiber Measurements, In: Peng G.-D. (eds) *Handbook of Optical Fibers*, Springer, Singapore, 2018, pp. 1–39. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1477-2_57-2
3. Chu P. L., *Electronics Letters*, 1977, vol. 13, no. 24, pp. 736–738. <https://doi.org/10.1049/el:19770520>
4. Гауэр Д. Волоконно-оптические линии связи: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1992. 100 с.
5. Marcuse D., *Principles of Optical Fiber Measurement*, N.Y., Academic Press, 1981, 360 p.
6. Philen D. L., Measurement and Characterization of Optical Fibers, In: Lin C. (eds), *Optoelectronic Technology and Light-wave Communications Systems*, Springer, Dordrecht, 1989, pp. 51–78. https://doi.org/10.1007/978-94-011-7035-2_2
7. Stewart W. J., A new technique for measuring the refractive index profiles of graded index optical fibers, Tech. Digest, *Int. Conf. Integrated Optics and Opt. Fiber Commun.*, Tokyo, Japan, July 1977, pp. 395, C2-2.

8. Афанасьев А. Н., Иванов А. Ф., Махров В. И., Шибеев А. А., Мяслицин Л. А., Платонов Н. Н. Измеритель профиля показателя преломления показателя преломления оптических кварцевых заготовок // Известия Челябинского научного центра. 2003. № 4. С. 15–19.

9. 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>

10. Yablon A. D., Multiwavelength optical fiber refractive index profiling, *Proc. SPIE 7580, Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications*, 2010, 758015. <https://doi.org/10.1117/12.841883>

References

1. Ivanova S. M., Eliseev O. V., Mikhailenko A. S., Studenikin O. L., Overview of optical fiber primary parameter methods, *Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt.*, 2008, no. 51, pp. 78–83. (In Russ.)
2. Ding M., Fan D., Wang W., Luo Y., Peng G.-D., Basics of Optical Fiber Measurements, In: Peng G.-D. (eds) *Handbook of Optical Fibers*, Springer, Singapore, 2018, pp. 1–39. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1477-2_57-2
3. Chu P. L., *Electronics Letters*, 1977, vol. 13, no. 24, pp. 736–738. <https://doi.org/10.1049/el:19770520>
4. Gowar J., *Optical Communication Systems*, Prentice-Hall International, Inc., London, Prentice/Hall International, Englewood Cliffs, NJ, 1984, 577 p.
5. Marcuse D., *Principles of Optical Fiber Measurement*, N.Y., Academic Press, 1981, 360 p.
6. Philen D. L., Measurement and Characterization of Optical Fibers, In: Lin C. (eds), *Optoelectronic Technology and Light-wave Communications Systems*, Springer, Dordrecht, 1989, pp. 51–78. https://doi.org/10.1007/978-94-011-7035-2_2
7. Stewart W. J., A new technique for measuring the refractive index profiles of graded index optical fibers, Tech. Digest, *Int. Conf. Integrated Optics and Opt. Fiber Commun.*, Tokyo, Japan, July 1977, pp. 395, C2-2.
8. Afanas'ev A. N., Ivanov A. F., Makhrov V. I., Shibaev A. A., Myalitsin L. A., Platonov N. N., Refractive Index Profile Meter for Optical Quartz Preforms, *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra*, 2003, no. 4, pp. 15–19 (In Russ.)
9. Vishnyakov G. N., Minaev V. L., Bochkareva S. S., *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2022, no. 5, pp. 4–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-4-9>
10. Yablon A. D. Multiwavelength optical fiber refractive index profiling, *Proc. SPIE 7580, Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications*, 2010, 758015. <https://doi.org/10.1117/12.841883>

Статья поступила в редакцию 05.07.2022; одобрена после рецензирования 02.08.2022; принята к публикации 09.08.2022. The article was submitted 05.07.2022; approved after reviewing 02.08.2022; accepted for publication 09.08.2022.

⁴ Приказ Минпромторга России № 232 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений показателя преломления» от 01.02.2022 г.

Научная статья

УДК 551.501.793

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-31-36>

Выбор оптимальных трасс для дистанционных измерений микроструктуры рассеивающего объекта

Георгий Петрович Арумов¹, Алексей Владимирович Бухарин²✉

^{1, 2} Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

¹arumov@iki.rssi.ru

²tumbul@iki.rssi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3171-3105>

Аннотация. Актуальной задачей дистанционного мониторинга рассеивающих частиц в нижнем слое атмосферы является разработка методов получения информации о микроструктуре рассеивающего слоя по измеряемому сигналу обратного рассеяния. Рассмотрены основные параметры микроструктуры приземного слоя атмосферы (концентрация и площадь поперечных сечений частиц) и основные измеряемые величины при лидарном зондировании (коэффициент обратного рассеяния и коэффициент экстинкции). При одночастотном лидарном зондировании рассматриваемым коэффициентам можно сопоставить микроструктуру эквивалентной рассеивающей среды, состоящей из монодисперсных частиц. Это позволяет интерпретировать коэффициенты обратного рассеяния и экстинкции через микроструктуру эквивалентной среды. Величиной, непосредственно связанной с поперечным размером частиц, служит угловой размер ореола вокруг пучка, распространяющегося в рассеивающей среде. На примере двухпозиционной схемы зондирования рассмотрены способы измерения углового размера ореола вокруг пучка, прошедшего через рассеивающий экран. Рассеивающий экран представляет собой непрозрачную плоскость с отверстиями, проекциями которых являются изображения частиц. Показано, что если угловой размер прошедшего через экран пучка увеличивается в два раза, то схема измерения углового размера ореола будет оптимальной. Это можно достичь либо выбором линейного увеличения, по которому созданы изображения частиц на экране, либо перемещением экрана вдоль линии зондирования. Реализация указанных способов позволяет описать содержащиеся в приземном слое атмосферы полидисперсные и несферические частицы через сечение эквивалентных частиц. Появляется возможность применения дистанционных методов в задаче мониторинга приземного слоя атмосферы.

Ключевые слова: зондирование, приземный слой, рассеяние, ореол, несферические частицы, лидар

Для цитирования: Арумов Г. П., Бухарин А. В. Выбор оптимальных трасс для дистанционных измерений микроструктуры рассеивающего объекта // Измерительная техника. 2022. № 10. С. 31–36. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-31-36>

Финансирование: работа выполнена в рамках программы Российской академии наук и Министерства науки и высшего образования по теме «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).

Selection of the optimal traces for remote measurements of the microstructure of a scattering object produced from particle images

Georgy P. Arumov¹, Alexei V. Bukharin²✉

^{1, 2} Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹arumov@iki.rssi.ru

²tumbul@iki.rssi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3171-3105>

Abstract. An urgent problem of remote monitoring of scattering particles in the lower atmosphere is the development of methods for obtaining information about the microstructure of the scattering layer from the measured backscatter signal. The main parameters of the microstructure of the surface layer of the atmosphere include the concentration and cross-sectional of particles. In lidar sensing, the main measured quantities are the backscatter coefficient and the extinction coefficient. For single-frequency lidar sounding, these coefficients can be associated with an equivalent scattering medium consisting of monodisperse particles. This makes it possible to interpret the backscatter coefficient and extinction through the microstructure of an equivalent medium. In lidar sounding, the quantity directly related to the transverse particle size is the angular size of the halo around the beam propagating in the scattering medium. On the example of a two-position probing scheme, methods for measuring the angular size of the halo around a beam that has passed through a scattering screen are considered. The diffusing screen is an opaque plane with holes whose projections are the images of particles. It is shown that if the angular size of the beam passing through the screen is doubled, then the measurement scheme will be optimal. This can be achieved either by choosing a linear magnification, according to which the images of particles on the screen are created, or by moving the screen along the probing line. The implementation of these methods makes it possible to describe the polydisperse and non-spherical particles contained in the surface layer of the atmosphere through the cross section of equivalent particles. It becomes possible to use remote methods in the problem of monitoring the surface layer of the atmosphere.

Keywords: sounding, surface layer, scattering, halo, non-spherical particles, lidar

Financial Support: The work was carried out within the framework of the program of the Russian Academy of Sciences and the Ministry of Science and Higher Education, subject "Monitoring", state registration no. 122042500031-8.

Введение. В описывающее обратный сигнал лидарное уравнение упругого рассеяния входят два неизвестных коэффициента – коэффициент обратного рассеяния и коэффициент экстинкции. Коэффициент экстинкции характеризует ослабление светового пучка в рассеивающей среде. Если коэффициентом экстинкции можно пренебречь, то по обратному сигналу можно однозначно определить зависимость коэффициента обратного рассеяния от расстояния вдоль трассы. Если коэффициентом экстинкции пренебречь нельзя, то нет возможности определять зависимость коэффициента обратного рассеяния вдоль зондируемой трассы. Для решения уравнения необходима информация о соотношении между этими коэффициентами, а также о граничных условиях, например о значениях указанных коэффициентов в некоторой точке в конце трассы. Тогда появляется возможность определить зависимость каждого из указанных коэффициентов от расстояния вдоль трассы.

При решении лидарного уравнения при некоторых условиях, например в атмосфере в условиях городской или сельской местности, а также над морской поверхностью, указанное соотношение может быть известно [1], что позволяет восстановить зависимость каждого из указанных коэффициентов вдоль всей зондируемой дистанции.

Однако нахождение взаимозависимости коэффициентов для приземного слоя атмосферы, как правило, затруднено из-за значительного разнообразия микрофизических и оптических параметров рассеивающих частиц (аэрозоль, пыль, сажа и т. д.). Существующие методы определения микрофизических свойств частиц рассеивающей среды основаны на использовании результатов зондирования рассеивающего объекта (рассеивающая среда, слой) [2] лидаром на нескольких длинах волн и значительного объема априорной информации. В результате задача определения микроструктуры рассеивающей среды из лидарных данных становится некорректной, так как параметрам исследуемого объекта соответствует бесконечное множество решений лидарных уравнений для нескольких длин волн. Для наиболее вероятного решения применяют различные критерии (выбирают невязки, параметры регуляризации, критерии усреднения полученных решений и т. д.). Также для решения требуются предположения об оптических и физических свойствах аэрозоля (диапазон для действительной и мнимой частей коэффициента преломления, вид функции распределения частиц по размерам и т. д. [3]). Решением задачи являются параметры функции распределения частиц по размерам, а также значения действительной и мнимой частей коэффициента преломления. Найденное решение, как правило, характеризуется большим диапазоном определяемых параметров аэрозоля. Из-за этого перспективы метрологического обеспечения дистанционных измерений микроструктуры рассеивающей среды выглядят неопределёнными. Описанные методы применяют для случаев, когда некоторый объем априорной информации об аэрозоле известен (вид функции распределения, диапазон

коэффициента преломления и т. д.) [4], например, при зондировании стратосферных облаков [5]. Однако в этом случае возникают значительные трудности при сопоставлении восстановленных и измеренных характеристик стратосферного аэрозоля. Нижний слой атмосферы содержит полидисперсные и несферические частицы, неоднородные по составу, размерам и оптическим свойствам. Это не позволяет использовать методы решения некорректной обратной задачи. При зондировании несферических частиц часто используют модели частиц в виде вытянутых и сплюснутых сфероидов [6]. Однако и в этой задаче актуальна разработка методов сопоставления микроструктур модельной и реальной сред. Базовые коэффициенты лидарного зондирования – коэффициент обратного рассеяния и коэффициент экстинкции – не являются индикаторами размеров и концентрации частиц. В пренебрежении многократным рассеянием поперечная трансформация распространяющегося в среде пучка может быть связана с рассеянием на частицах среды. Чем больше поперечный размер частицы, тем меньше угол рассеяния. В [7] на примере специальных экранов показано, что угловую трансформацию пучка, прошедшего через состоящий из рассеивающих частиц слой, можно представить в виде суммы геометрически неискажённой волны и ореола, образованного рассеянием вперёд. Такой подход делает возможным сопоставление микроструктуре исследуемого слоя микроструктуры оптически эквивалентного (модельного) слоя, состоящего из монодисперсных сферических частиц с эквивалентными сечениями. Эквивалентный слой имеет такие же базовые коэффициенты (коэффициент обратного рассеяния и коэффициент экстинкции) и угловое искажение пучка, как исследуемая среда. Тогда угловому размеру ореола и коэффициенту пропускания можно сопоставить концентрацию эквивалентных частиц. Обратное рассеяние и концентрация эквивалентных частиц позволяют определить дифференциальное сечение обратного рассеяния на отдельной эквивалентной частице. В этом случае сигнал обратного рассеяния можно использовать для определения концентрации эквивалентных частиц. Ранее обосновано, что эквивалентное сечение определяется отношением второго момента для функции распределения частиц по поперечным сечениям к соответствующему моменту первого порядка [7]. Экспериментально определить эквивалентные сечения частиц через геометрию ореола позволяют экраны, изготовленные по изображениям как полидисперсных, так и несферических частиц. Значение коэффициента экстинкции и эквивалентное сечение частицы определяют концентрацию частиц в рассеивающем слое.

Цель исследования – в рамках модели одночастотных лидаров с однопозиционной схемой (ОПС) и двухпозиционной схемой (ДПС) рассмотреть способы выбора оптимальных трасс для измерения микроструктуры рассеивающих объектов с применением эквивалентных сечений.

Однопозиционная схема зондирования. На рис. 1 представлены два вида случайных пропускающих экранов (СПЭ),

где $d_{и.ч}$ – поперечный размер изображений монодисперсных частиц; $n_{и.ч}$ – поверхностная плотность изображений частиц.

Экран p -типа (*positive*, $2d(p)$ -экран) получен по чёрно-белому контрастному снимку частиц рассеивающего слоя. Экран n -типа (*negative*, $2d(n)$ перфорированный экран) – негатив экрана p -типа. На приведённых экранах белым цветом обозначены прозрачные участки ($p=1$), чёрным цветом – непрозрачные участки ($p=0$). При прохождении пучка через СПЭ происходит поглощение и трансформация поперечного размера пучка. Угловой размер пучка после прохождения СПЭ увеличивается за счёт дифракции на изображениях частиц. Указанный экран действует на пучок следующим образом: 1) поглощает пучок; 2) производит поперечные искажения пучка, обусловленные дифракцией на изображениях частиц. Для $2d(p)$ -экрана увеличение углового размера пучка происходит за счёт дифракции на непрозрачных участках экрана, для $2d(n)$ -экрана – за счёт дифракции на отверстиях экрана.

$2d(p)$ -экран является аналогом рассеивающего объекта по коэффициенту экстинкции и угловому искажению пучка. С некоторым увеличением микроструктура этого экрана воспроизводит (копирует) микроструктуру исследуемого слоя. По поперечным искажениям прошедшего через экран пучка можно смоделировать соответствующие искажения пучка для исследуемого рассеивающего слоя. Указанные искажения пучка (поля зрения) возникают из-за появления ореола при рассеянии вперёд на непрозрачных участках экрана. Для $2d(p)$ -экрана энергия ореола много меньше энергии геометрически неискажённого пучка.

Согласно принципу Бабинне, практически весь пучок, прошедший через $2d(n)$ -экран, трансформируется в энергию ореола [7]. Этот экран предназначен для определения углового размера ореола.

Рассмотрим идеальные схемы зондирования, в которых поля зрения и угловые размеры пучков для всех каналов одинаковы. В коаксиальном канале идеальной ОПС детектор совмещён с излучателем и поле зрения детектора совпадает с угловым размером пучка (рис. 2).

В точке $O(0; 0)$ находятся точечные приёмник и источник. Формирующий поля зрения и геометрию пучка объектив L с фокусным расстоянием F имеет радиус a и расположен в плоскости отверстия. Предположим, что детектор и излучатель находятся в фокальной плоскости объектива. Диаметр приёмника и излучателя обозначим как d . На дальних дистанциях поле зрения и угловой размер пучка близки к углу $\Phi_0 = d/F$.

Трассовую зависимость сигнала обратного рассеяния от поверхности объекта в пределе геометрической оптики можно представить в виде

$$I(z) = I_0 / (z/Z_6)^2 \quad \text{при } z > Z_6, \quad (1)$$

где I_0 – сигнал обратного рассеяния на расстоянии Z_6 ; Z_6 – длина ближней зоны (на расстоянии Z_6 до некоторой плоскости диаметр пучка равен диаметру выходной апертуры объектива).

Длину ближней зоны Z_6 можно оценить по отношению диаметра $2a$ отверстия с линзой (см. рис. 2) к образованному полюм зрения углу Φ_0 .

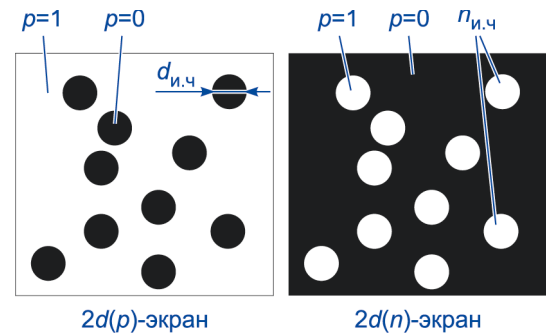


Рис. 1. Случайные пропускающие экраны p -типа ($2d(p)$ -экран) и n -типа ($2d(n)$ -экран)

Fig. 1. Random transmission screens of p -type ($2d(p)$ -screen) and n -type ($2d(n)$ -screen)

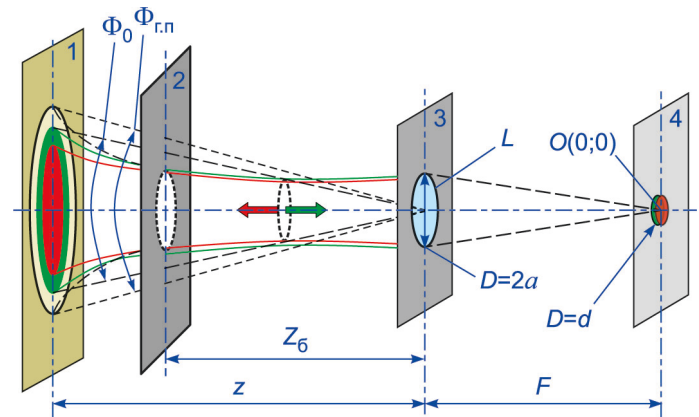


Рис. 2. Идеальная коаксиальная схема зондирования: 1 – рассеивающая плоскость; 2–4 – плоскости расположения соответственно экрана, апертуры приёмного и передающего каналов, приёмника и передатчика

Fig. 2. Ideal coaxial sensing scheme: 1 – scattering plane; 2 – the plane of the screen; 3 – the plane of the aperture of the receiving and transmitting channels; 4 – the plane of the receiver and transmitter

На расстояниях $z > Z_6$ размер пучка представляет собой конус с вершиной в плоскости объектива, при $z < Z_6$ происходит немонотонное формирование геометрии пучка с образованием перетяжки и зависимость (1) не выполняется. Угол Φ_0 определяется отношением диаметра приёмной площади d к фокусному расстоянию F линзы L . Отсюда следует, что начиная с расстояния Z_6 поперечный размер пучка монотонно увеличивается. Следовательно, расстояние Z_6 можно выбрать как минимальное для размещения экрана, созданного по изображениям частиц.

Установка СПЭ на расстоянии $z \geq Z_6$ приведёт к одновременному увеличению поля зрения и углового размера пучка. Поперечную трансформацию зондирующего пучка можно смоделировать в виде суперпозиции геометрически неискажённой части пучка и ореола, образованного в результате рассеяния вперёд на неоднородностях экрана. В таком представлении угловое искажение пучка из точки $O(0; 0)$ описывается выражением [7]:

$$z_{г.п}^{-2} = p^2/z^2 + (1-p^2)/z_{ор}^2, \quad (2)$$

где $z_{г.п}$ – расстояние, на котором геометрический размер пучка без СПЭ равен геометрическому размеру пучка с СПЭ; p – пропускание СПЭ; z – расстояние от выходной апертуры линзы L до поверхности объекта; $z_{ор}$ – расстояние между поверхностью объекта и входным объективом коаксиальной схемы, формирующей пучок (поле зрения) с угловым размером ореола при рассеянии вперёд $\Phi_{ор}$.

В (2) учтено двукратное пересечение пучком экрана при проходе пучка в сторону поверхности объекта и обратно. Из (2) следует, что при наличии СПЭ наблюдаемый угловой размер пучка $\Phi_{г.п}$ из точки $O(0; 0)$ будет больше из-за поперечного искажения пучка на рассеивающих неоднородностях СПЭ. Угловой размер прошедшего через СПЭ пучка $\Phi_{г.п}$ найдём по $z_{г.п}$ (см. (2)) [7]:

$$\Phi_{г.п} = (z_{г.п}/z)\Phi_0.$$

Для $2d(p)$ -экрана первое слагаемое в правой части выражения (2) представляет собой геометрически неискажённую часть пучка, второе слагаемое описывает геометрию ореола, при этом первое слагаемое существенно больше второго.

Для $2d(n)$ -экрана второе слагаемое много больше первого из-за того, что вся мощность прошедшего через $2d(n)$ -экран пучка формирует геометрию ореола. В этом случае угловой размер ореола будет определён через $z_{ор}$ с максимальной точностью, так как именно второе слагаемое в (2) содержит информацию об угловом размере ореола через $z_{ор}$.

Из (2) следует, что при установке $2d(n)$ -экрана на расстоянии Z_6 интенсивность $I_1(z)$ от поверхности объекта начинает убывать быстрее с расстоянием из-за одновременного увеличения поля зрения и углового размера пучка (см. (1)):

$$I_1(z) = p^2 I_0 Z_6^2 / z_{г.п}^2, \quad (3)$$

где I_0 – интенсивность на расстоянии Z_6 без $2d(n)$ -экрана; p – пропускание $2d(n)$ -экрана.

Отметим, что поперечный размер пятна, соответствующий $\Phi_{г.п}$, находится между угловым размером ореола и поперечным размером пучка ($z_{г.п} > z$, см. рис. 2). Из (3) следует, что значение Z_6 является аналогом продольного размера зондирующей схемы без линз. Из выражения (3) следует, что пропускание экрана определяется как

$$p = \frac{z_{г.п}}{Z_6} \sqrt{I_1(z)/I_0}. \quad (4)$$

Выражение (4) учитывает поперечные искажения пучка через значение $z_{г.п}$. Тогда угловой размер ореола вокруг пучка $\Phi_{ор}(2d(n))$ из находящейся на расстоянии Z_6 плоскости $2d(n)$ -экрана определяется как

$$\Phi_{ор}(2d(n)) = \Phi_0 \Gamma_{ор}; \quad (5)$$

$$\Gamma_{ор}(2d(n)) = (z_{ор} - Z_6)/(z - Z_6),$$

где $\Gamma_{ор}(2d(n))$ – коэффициент углового увеличения для ореола из находящейся на расстоянии Z_6 плоскости СПЭ (см. рис. 1).

Выражения (4), (5) дают базовые величины для дальнейшего восстановления микроструктуры эквивалентного $2d(n)$ -экрана. Из (5) следует, что угловой размер ореола при установке СПЭ в плоскость объектива L составит

$$\Phi_{ор}(L) = (z_{ор}/z)\Phi_0.$$

Угловой размер ореола $\Phi_{ор}(2d(n))$ из плоскости СПЭ может быть намного больше углового размера ореола из плоскости объектива $\Phi_{ор}(L)$.

Оптимальный размер изображений частиц $d_{и.ч}$ на $2d(n)$ -экране (см. рис. 1) должен составлять величину, равную отношению длины волны λ к угловому размеру приёмного канала Φ_0 [7]. Соответствующее увеличение $\Gamma_{ор} = \lambda/(d_{и.ч}\Phi_0)$. В этом случае СПЭ следует установить в плоскости объектива. Тогда угловой размер ореола будет в два раза превышать угловой размер пучка.

Такого же результата можно достичь перемещением $2d(n)$ -экрана с $\Gamma_{ор} = 1$ в сторону поверхности объекта (см. (5)). Таким образом, значение $\Gamma_{ор} = 2$ можно выбрать в качестве оптимального.

Выражения (4), (5) содержат две неизвестные величины $z_{г.п}$, $z_{ор}$, характеризующие поперечные искажения прошедшего через $2d(n)$ -экран пучка. Следовательно, лидеры с ОПС не позволяют измерять такие искажения. Это не даёт возможности одновременно определить базовые характеристики p , $z_{ор}$ микроструктуры экрана. Измерять эти величины позволяет двухпозиционная схема.

Двухпозиционная схема зондирования. ДПС зондирования с двумя разделёнными оптическими каналами представлена на рис. 3.

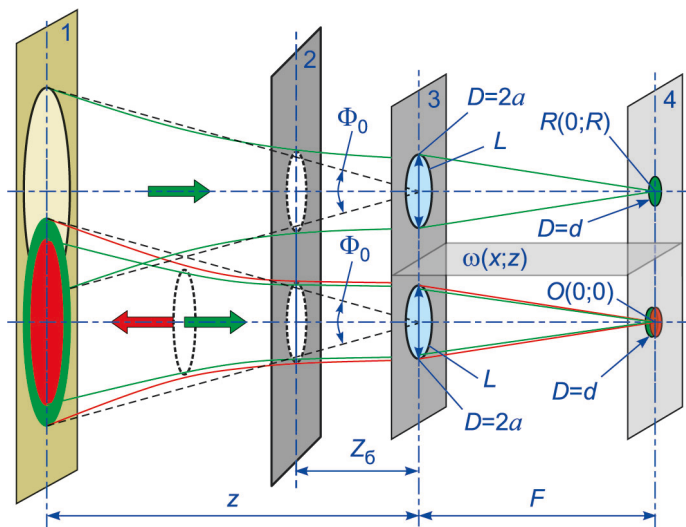


Рис. 3. Двухпозиционная схема зондирования с двумя приёмными каналами ДПС: 1–4 – то же что на рис. 2

Fig. 3. Two-position sounding scheme with two TPS receiving channels: the location of the main planes 1–4 as in Fig. 2

Выше перегородки $\omega(x; z)$ находится оптическая ось дополнительного приёмного канала. Ниже указанной перегородки располагается основной коаксиальный канал, в котором передатчик и приёмник совмещены. Оптическая ось основного канала проходит через точку $O(0; 0)$. Канал с проходящей через точку $O(0; 0)$ оптической осью, расположенный ниже перегородки $\omega(x; z)$ представляет собой идеальную однопозиционную схему с ОПС. В идеальной ОПС поле зрения приёмного канала совпадает с угловым размером зондирующего пучка. ДПС в отличие от ОПС позволяет измерять отношение сигналов для основного и дополнительного приёмных каналов. Это отношение зависит от угловых искажений пучка (полей зрения).

Для рассматриваемой ДПС должны выполняться следующие требования: совпадение полей зрения первого и второго приёмных каналов с угловым размером зондирующего пучка на расстояниях $z > Z_6$; соблюдение пределов геометрической оптики; параллельность оптических осей всех каналов.

Отношение сигналов $\Pi(z) = I(R; z)/I(0; z)$ представляет собой в параксиальном приближении [8] геометрический форм-фактор приёмного и передающего каналов ДПС, и его можно представить в виде выражения (см. [9]):

$$\Pi(z) = \frac{I(R; z)}{I(0; z)} = \Pi\left(\frac{R^2}{4a^2(z/Z_6)^2}\right). \quad (6)$$

С учётом геометрии на рис. (3) $\Pi(z) = 0$ при $z = 0$, $\Pi(z) = 1$ при $z \gg Z_6$. Трассовая зависимость (6) отношения сигналов является локальной калибровкой для ДПС. Измерения этой зависимости необходимы для определения поперечного искажения пучка. Например, увеличение поперечных размеров пучка приводит к увеличению измеряемого по локальной калибровке расстояния.

Из (6) следует, что в отсутствие искажений пучка (поля зрения) трассовая зависимость сигнала обратного рассеяния от поверхности объекта для дополнительного приёмного канала отличается от (1):

$$I(R; z) = I_0 \Pi(z) / (z/Z_6)^2.$$

Установка СПЭ в виде $2d(n)$ -экрана приводит к угловому увеличению зондирующего пучка и полей зрения. В результате измеряемое по отношению интенсивностей расстояние увеличивается с z до $z_{г.п}$. Расстояние $z_{г.п}$ для нового отношения сигналов при размещении $2d(n)$ -экрана перед зондирующей системой может быть определено ДПС из данных локальной калибровки как

$$\Pi_3(z) = \Pi(z_{г.п}),$$

где $\Pi_3(z)$ – отношение обратных сигналов при установке $2d(n)$ -экрана; $\Pi(z_{г.п})$ – соответствующее отношение обратных сигналов для поверхности объекта, находящегося на расстоянии $z_{г.п}$ без $2d(n)$ -экрана. Значение $z_{г.п}$, найденное с учётом локальной калибровки, даёт пропускание p экрана согласно выражению (4).

Используем (2) и найдём расстояние

$$z_{ор} = \sqrt{(1-p^2)/(z_{г.п}^{-2} - p^2 z^{-2})}. \quad (7)$$

Угловой размер ореола определяется выражениями (5). Угол $\Phi_{ор}$ связан с углом дифракции от плоской волны Φ_d выражением

$$\Phi_d = \Phi_{ор} - \Phi_0.$$

Таким образом, величины p , Φ_d измеряются с помощью схемы ДПС.

Эквивалентное сечение прозрачных отверстий $S_{э.кв}$ и их поверхностная плотность $n_{э.кв}$ на $2d(n)$ -экране определяются как

$$S_{э.кв} = C_1 \pi (\lambda/\Phi_d)^2, \quad n_{э.кв} = p/S_{э.кв},$$

где C_1 – калибровочный коэффициент.

Коэффициент C_1 можно измерить с помощью стандартного $2d(n)$ -экрана (см. рис. 1) с монодисперсными отверстиями. Этот экран должен иметь известные значения поверхностной плотности и поперечного сечения отверстий.

Рассмотрим пример. Допустим, поперечные размеры частиц равны 100λ и $\Phi_0 = 1$ мрад. Тогда угловой размер ореола от $2d(n)$ -экрана, установленного в плоскости объектива, будет в 10 раз превышать угловой размер зондирующего пучка Φ_0 . Во втором слагаемом в выражении (2) знаменатель будет в 100 раз больше, чем в первом слагаемом только за счёт поперечных искажений пучка. Данная схема не является оптимальной в задаче измерения $z_{ор}$ из-за малого значения второго слагаемого в (2). Измерения $z_{ор}$ будут оптимальными, если размеры изображений частиц увеличить в $\Gamma_{ор} = 10$ раз. В этом случае угловой размер ореола будет превышать в два раза угловой размер пучка (угол дифракции от плоской волны на отверстии равен угловому размеру пучка). Можно также не увеличивать изображения частиц, а переместить $2d(n)$ -экран к поверхности объекта. Так, если $Z_n = 100$ м, $z = 110$ м, то расстояние $z_{ор}$ из плоскости объектива L , найденное из (5), составит 200 м. Это означает, что угловой размер ореола, наблюдаемый из плоскости объектива ОПС, будет только в два раза превышать угловой размер зондирующего пучка. Такая геометрия является оптимальной в задаче измерения углового размера ореола. Таким образом, оптимальную схему измерений углового размера ореола можно реализовать как через увеличение изображений частиц, так и перемещением $2d(n)$ -экрана в сторону поверхности объекта (см. рис. 2). Из этого примера следует, что угловой размер ореола, наблюдаемый из плоскости объектива, сравним с угловым размером пучка, а угловой размер ореола из плоскости СПЭ может существенно превышать угловой размер пучка.

Использование идеальных коаксиальных схем является перспективным для применения в миниатюрных лидарах с безопасным для глаз уровнем мощности зондирующего излучения. В [10] рассмотрена конфигурация миниатюрной зондирующей схемы с применением оптоволоконных делителей. Отмечены преимущества таких систем. В частности, геометрический форм-фактор приёмного и передающего каналов одинаков на всей дистанции. Использование диодных лазеров с управлением

током позволяет калибровать обратный сигнал установкой стандартных рассеивающих экранов [11] на трассе с фиксированной дальностью с последующим восстановлением формы лидарного сигнала из однородной атмосферы.

Предложенный подход характеризуется тем, что коэффициент пропускания и угловой размер ореола вокруг пучка выступают как ключевые параметры для микроструктуры эквивалентного рассеивающего объекта.

Обсуждение результатов. При использовании оптических элементов в виде линз в ближней зоне зондирующей системы возникает перетяжка пучка. После перетяжки поперечный размер пучка монотонно увеличивается с расстоянием и его трансформация определяется методами геометрической оптики. На расстоянии $Z_6 = 2a/\Phi_0$ поперечный размер пучка (поля зрения) приблизительно равен размеру выходной апертуры объектива. Это минимальное расстояние, которое можно использовать в задаче измерения трансформации пучка. Оптимальной схеме измерений соответствует случай, когда угловой размер ореола от пересекающей рассеивающий объект плоской волны равен угловому размеру пучка. В этом случае угловой размер ореола от зондирующего пучка будет в два раза больше углового размера пучка ($\Gamma_{op} \approx 2$). При использовании $2d(n)$ - и $2d(p)$ -экранов оптимальную схему измерений можно реализовать посредством линейного увеличения изображений частиц. Если $2d(n)$ -экран изготовлен с коэффициентом линейного увеличения $\Gamma = 2$ для малых частиц (более 1 мкм), то $2d(n)$ -экран следует располагать на расстоянии $Z_6 = 2a/\Phi_0$ от входного объектива. Если $\Gamma = \lambda/(d_{и.ч}\Phi_0)$, то для оптимальной схемы измерений $2d(n)$ -экран следует располагать в плоскости выходного объектива. Таким образом, оптимальные схемы измерений можно получить как посредством изменения расстояния между СПЭ экраном и лидаром на трассах с фиксированной дальностью, так и по линейному увеличению изображений частиц на перфорированном $2d(n)$ -экране. Чем дальше экран находится от лидара, тем меньше должно быть поперечное сечение изображений рассеивающих частиц. Поскольку эквивалентное сечение определяется однозначно только по угловому размеру ореола вокруг пучка, то для его измерения необходимо применение двухпозиционных схем. Кроме того, выбор углового размера ореола для определения эквивалентного сечения частиц позволяет применять такой метод, как для полидисперсных, так и несферических частиц. Наличие таких частиц является характерным для приземных слоёв атмосферы.

Закключение. В результате исследования схем измерений эквивалентных сечений частиц по угловому размеру ореола при рассеянии вперёд показано, что оптимальную схему измерений сечений частиц можно реализовать как через выбор коэффициента увеличения для изображений частиц, так и перемещением экрана вдоль линии зондирования. На примере экранов, созданных по изображениям частиц, показано, что с уменьшением размеров частиц рассеивающий экран следует располагать ближе к поверхности топографического объекта. Это даёт возможность выбирать оптимальные схемы измерений

эквивалентных сечений частиц в зондируемом слое на горизонтальных трассах. Предложенный подход применим к полидисперсным и несферическим частицам (сечения в виде невыпуклых фигур – нитей, изогнутых полос, колец и т. п.), для которых определение поперечных сечений по цифровым фотографиям представляет значительные трудности.

Список источников / References

1. Paramesvaran K., Rose K. O., Krishna Murthy B. V., *Applied Optics*, 1991, vol. 30, no. 21, pp. 3059–3071. <https://doi.org/10.1364/AO.30.003059>
2. Veretennikov V. V., Kozlov V. S., Naats I. E., Fadeev V. Ya., *Optics Letters*, 1979, vol. 4, no. 12, pp. 411–413. <https://doi.org/10.1364/OL.4.000411>
3. Chemyakin E., Burton S., Kolgotin A., Müller D., Hostetler C., and Ferrare R., *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 9, pp. 2188–2202. <https://doi.org/10.1364/AO.55.002188>
4. Veselovskii I., Kolgotin A., Griaznov V., Muller D., Wandinger U., Whiteman D. N., *Applied Optics*, 2002, vol. 41, no. 18, pp. 3685–3699. <https://doi.org/10.1364/AO.41.003685>
5. Hoffnagle J. A., Jefferson C. M., *Applied Optics*, 2000, vol. 39, no. 30, pp. 5488–5499. <https://doi.org/10.1364/AO.39.005488>
6. Mishchenko M. I., *Journal Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, vol. 110, no. 11, pp. 808–832. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2008.12.005>
7. Арумов Г. П., Бухарин А. В. Использование специальных экранов, моделирующих рассеянное в среде излучение, для измерения эквивалентного поперечного сечения частиц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 298–306 [Arumov G. P., Buharin A. V., *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 298–306. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-298-306>
8. Born M., Wolf E., *Principles of Optics*, 4th ed., Oxford and New York, Pergamon Press, 1970, 854 p.
9. Арумов Г. П., Бухарин А. В., Тюрин А. В. // Международная конференция MCC-14: Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность, 24–27 ноября 2014 г. Сборник трудов. М.: ЛЕНАНД, 2014. С. 18–23 [Arumov G. P., Buharin A. V., Tjurin A. V., *Proc. International Conference MSS-14 "Mode Conversion, Coherent Structures And Turbulence"*, Moscow, 24–27 November 2014, LENAND Publ., 2014, pp. 18–23. (In Russ.)].
10. Арумов Г. П., Бухарин А. В. Выбор конфигурации миниатюрного лидара для калибровки сигнала обратного рассеяния // Оптические методы исследования потоков: Труды XV Международной научно-технической конференции, 24–28 июня 2019. М.: Издательство «Перо», 2019. С. 23–31 [Arumov G. P., Buharin A. V., *Proc. 15th International Scientific and Technical Conference "Opticheskie metody issledovaniya potokov"*, 24–28 June, Moscow, Pero Publ., 2019, pp. 23–31. (In Russ.)].
11. Kavaya M. J., Menzies R. T., *Applied Optics*, 1985, vol. 24, no. 21, pp. 3444–3453. <https://doi.org/10.1364/AO.24.003444>

Статья поступила в редакцию 25.10.2021; одобрена после рецензирования 27.07.2022; принята к публикации 01.08.2022.
The article was submitted 25.10.2021; approved after reviewing 27.07.2022; accepted for publication 01.08.2022.

Расчётные и экспериментальные методы оценки характеристик чувствительности виброиндукционного преобразователя

Юрий Львович Николаев¹, Алексей Андреевич Саморуков^{2✉}, Артем Андреевич Борисенко³

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия, nikolaev_ul@mail.ru

^{2, 3} ООО «ТМС РУС», Москва, Россия, ²samorukov.alexey@gmail.com[✉], ³xteam2005@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены методы оценки характеристик чувствительности виброиндукционного преобразователя, предназначенного для контроля нарушения сплошности поверхности объектов при их намагничивании приложенным постоянным полем. На основании анализа математической модели выходного сигнала виброиндукционного преобразователя получены аналитические выражения для коэффициентов преобразования скорости изменения напряжённости магнитного поля и ускорения по координате виброперемещения преобразователя в электродвижущую силу индукции катушки. Приведены методики экспериментальной оценки коэффициентов преобразования и показана высокая сходимости расчётных и экспериментальных оценок. На основании сформулированных условий выявления аномалий магнитных полей, возникающих над дефектными участками поверхности, и известных коэффициентов преобразования получены расчётные соотношения для оценки порогов чувствительности преобразователя по ортогональным составляющим распределения напряжённости магнитного поля. В результате экспериментальной проверки подтверждена адекватность расчётных и экспериментальных оценок порогов чувствительности. Даны рекомендации по применению расчётных и экспериментальных методов оценки характеристик чувствительности виброиндукционного преобразователя.

Ключевые слова: магнитная дефектоскопия, виброиндукционный преобразователь, характеристики чувствительности

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

Для цитирования: Николаев Ю. Л., Саморуков А. А., Борисенко А. А. Расчётные и экспериментальные методы оценки характеристик чувствительности виброиндукционного преобразователя // Измерительная техника. 2022. № 10. С. 37–43. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-37-43>

Determination and evaluation of sensitivity characteristics a vibration induction transducer for magnetic flaw detection

Yuriy L. Nikolaev¹, Alexey A. Samorukov^{2✉}, Artem A. Borisenko³

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, nikolaev_ul@mail.ru

^{2, 3} TMS RUS Limited Liability Company, Moscow, Russia, ²samorukov.alexey@gmail.com[✉], ³xteam2005@gmail.com

Abstract. Methods for assessing the sensitivity characteristics of a vibration induction converter designed to control the discontinuity of the surface of objects when they are magnetized by an applied constant field are described. Based on the analysis of the mathematical model of the output signal of the converter, analytical expressions are obtained for the conversion coefficients of the rate of change in the magnetic field strength and acceleration along the coordinate of the vibration displacement of the converter in the EMF induction coil. The methods of experimental estimation of conversion coefficients are given and the high convergence of calculated and experimental estimates is shown. Based on the formulated conditions for the detection of magnetic field anomalies arising on the defective surface areas and the known values of the conversion coefficients, calculated ratios were obtained to estimate the sensitivity thresholds of the converter according to the orthogonal components of the magnetic field strength distribution. As a result of the experimental verification, the adequacy of the calculated and experimental estimates of the sensitivity thresholds was confirmed. Recommendations are given on the application of computational and experimental methods for assessing the sensitivity characteristics of a vibration induction transducer.

Keywords: magnetic flaw detection, vibration-induction transducer, sensitivity characteristics

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

Введение. Измерительные методы магнитной дефектоскопии основаны на получении и обработке измерительной информации о распределении напряжённости (индукции)

магнитного поля над намагниченными объектами контроля в результате сканирования их поверхности магнитоизмерительными преобразователями (МИП) [1]. В процессе контроля

ось чувствительности МИП ориентируют нормально или тангенциально по отношению к контролируемой поверхности. Дефекты типа нарушения сплошности поверхности объектов выявляют по возникающим в зоне контроля аномалиям распределения составляющих (нормальной, тангенциальной) напряжённости.

В магнитной дефектоскопии чувствительность МИП определяют как по отношению к напряжённости магнитного поля, так и по отношению к вызванному дефектом изменению напряжённости. Для этого используют расчётные и/или экспериментальные методы. Расчётные соотношения, характеризующие чувствительность одинарных и дифференциальных (градиентометрических) магнитостатических преобразователей (преобразователей Холла, феррозондов, магниторезисторов и др.), изложены в ряде публикаций, например [2–7]. Чувствительность индукционных преобразователей характеризуется коэффициентом преобразования при их статическом положении в однородном переменном магнитном поле [8]. Калибровка магнитостатических и индукционных преобразователей выполняется по ГОСТ 8.030-2013¹ с помощью соответствующих мер магнитных величин, рабочих эталонов 1-го и 2-го разрядов, воспроизводящих однородное по напряжённости, постоянное или переменное магнитное поле. К характеристикам чувствительности МИП также относится порог чувствительности к магнитному полю над дефектом. Порог чувствительности определяют по наименьшему зарегистрированному изменению напряжённости поля, вызванному изменением магнитного поля над дефектом.

Для регистрации постоянных неоднородных магнитных полей над дефектами перспективно применение однокомпонентных и двухкомпонентных виброиндукционных преобразователей (ВИП), работающих в режиме виброперемещения катушки индуктивности [9–12]. В отличие от магнитостатических преобразователей, выявляющих аномалии магнитного поля только по амплитудному значению выходного сигнала, информативными параметрами сигнала ВИП, однозначно связанными с параметрами распределения магнитного поля дефекта, являются амплитуда и фаза гармоник, кратных частоте колебаний катушки.

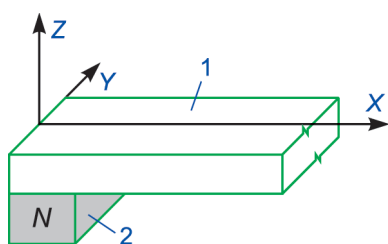


Рис. 1. Система координат трёхмерной функции распределения напряжённости поля:

1 – контрольный образец; 2 – полюс постоянного магнита

Fig. 1. Coordinate system of the three-dimensional field strength distribution function: 1 – control sample; 2 – permanent magnet pole

В результате увеличения количества диагностических признаков сигнала и соотношения сигнал/помеха [13], значительно возрастает достоверность выявления дефектов.

В связи с динамическим режимом контроля и соизмеримостью размеров катушки ВИП с диапазоном рассеяния неоднородного магнитного поля дефекта определение характеристик чувствительности ВИП непосредственно в поле дефекта крайне затруднительно. Для этого необходимо аналитическое или экспериментальное описание трёхмерного распределения контролируемой характеристики поля по элементам сечения катушки. Данное обстоятельство определяет актуальность применения экспериментальных методов для оценки характеристик чувствительности ВИП.

Цель настоящих исследований – методическое обоснование и разработка расчётных и экспериментальных методов оценки характеристик чувствительности ВИП к магнитным полям дефектов с учётом особенностей их распределения.

Определение характеристик чувствительности ВИП расчётными методами. Чувствительность ВИП к контролируемой характеристике магнитного поля определяется по функции преобразования этой характеристики в электродвижущую силу (ЭДС) индукции катушки ВИП. В магнитной дефектоскопии в качестве контролируемой характеристики магнитного поля рассеяния дефекта принято рассматривать напряжённость поля как величину, не зависящую от магнитной проницаемости среды контроля.

Функциональную зависимость ЭДС индукции $e(t)$ от функции распределения напряжённости магнитного поля $H(x(t), y, z)$ в системе координат X, Y, Z (рис. 1) при колебаниях катушки вдоль оси X можно представить в виде

$$e(t) = -\mu \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^n H_{ij}(x(t), y, z) \Delta S_{ij}, \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость среды контроля; $j=1, \dots, n$ – число элементов разбиения площади витка катушки; $i=1, \dots, w$ – число витков катушки; $H_{ij}(x(t), y, z)$ – трёхмерная функция распределения напряжённости магнитного поля по элементам ΔS_{ij} ; ΔS_{ij} – j -й элемент площади i -го витка катушки, в пределах которого в фиксированный момент времени t_0 распределение напряжённости магнитного поля можно считать равномерным; $x(t) = x_0 + a \sin \omega t$ – уравнение виброперемещения катушки; x_0 – координата положения центра катушки; a, ω – амплитуда и круговая частота колебаний.

Дифференцирование (1) по времени как сложной функции с учётом вида уравнения для $x(t)$ даёт выражение

$$e(t) = -\mu a \omega \cos \omega t \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^n \frac{\partial H_{ij}(x(t), y, z)}{\partial x} \Delta S_{ij}. \quad (2)$$

Из анализа производной разложения функции $H_{ij}(x(t), y, z)$ по переменной x в окрестности точки (x_0, y_0, z_0) в ряд Тейлора

¹ ГОСТ 8.030-2013. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции.

2-го порядка следует, что чувствительность ВИП можно рассматривать как в отношении скорости изменения напряжённости поля по координате x , так и в отношении ускорения, характеризуя чувствительность к этим величинам коэффициентами 1-го и 2-го порядков k_1 , k_2 соответственно. Целесообразность определения двух коэффициентов чувствительности обусловлена особенностями распределений составляющих напряжённости магнитного поля над центром дефекта: в виде прямой для нормальной составляющей или параболы для тангенциальной составляющей.

Оптимальным условием определения коэффициента k_1 является постоянство скорости изменения напряжённости магнитного поля по координате x для всех элементов ΔS_{ij} в пределах размаха колебаний катушки $|x| \leq (x_0 + L/2 + a)$, где L – размер катушки по координате x :

$$\frac{\partial H_{ij}(x(t), y, z)}{\partial x} = \frac{\partial H(x(t))}{\partial x} = G(x_0) = \text{const.} \quad (3)$$

С учётом (2), (3) ЭДС индукции i -го витка катушки определим из выражения

$$e_i(t) = -\mu a \omega G(x_0) \cos \omega t \sum_{j=1}^n S_{ij} = -\mu a \omega G(x_0) S_i \cos \omega t,$$

Просуммируем ЭДС по всем виткам катушки и получим выражение

$$e(t) = -\mu a \omega G(x_0) \cos \omega t \sum_{i=1}^w S_i = -\mu a \omega G(x_0) w S_m \cos \omega t, \quad (4)$$

где $S_m = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^w S_i$ – средняя площадь витков катушки.

Из (4) следует, что сигнал $e(t)$ является гармонической функцией с частотой колебаний катушки ω , причём амплитудное значение E_1 сигнала ВИП прямо пропорционально скорости изменения напряжённости $G(x_0)$ в точке x_0 . В этом случае чувствительность ВИП, определяемую как отношение приращения амплитуды первой гармоники ЭДС индукции ΔE_1 к приращению скорости изменения напряжённости $\Delta G(x_0)$ по координате x , можно характеризовать коэффициентом преобразования k_1 , определяемым отношением амплитудного значения E_1 к скорости $G(x_0)$:

$$k_1 = \frac{\Delta E_1}{\Delta G(x_0)} = \frac{E_1}{G(x_0)} = \mu a \omega w S_m. \quad (5)$$

В соответствии с определением (5) выполняются экспериментальная и/или расчётная оценки k_1 . Условие (3) предполагает однородность магнитного поля по скорости изменения напряжённости для всех элементов ΔS_{ij} катушки.

Пусть линейность функции $H_{ij}(x(t), y, z)$ по переменной x в пределах размаха колебаний катушки соблюдается, однако скорость изменения напряжённости зависит от переменных y, z . В этом случае при условии разбиения площади i -го витка катушки на n равных по площади элементов $\Delta S_{ij} = S_i/n$ выражение для ЭДС i -го витка примет вид

$$e_i(t) = -\mu a \omega \frac{S_i}{n} \cos \omega t \sum_{j=1}^n G_{ij}(x_0, y, z) = -\mu a \omega G_{im}(x_0) S_i \cos \omega t,$$

где $G_{im}(x_0)$ – средняя по всем элементам площади витка скорость изменения напряжённости по координате x .

Суммарная ЭДС по всем виткам составит

$$e(t) = -\mu a \omega \cos \omega t \sum_{i=1}^w [S_i G_{im}(x_0)] = -\mu a \omega w S_m G_m(x_0) \cos \omega t, \quad (6)$$

где $G_m(x_0) = \sum_{i=1}^w h_i G_{im}(x_0)$ – средневзвешенная скорость изменения напряжённости; $h_i = S_i / \sum_{i=1}^w S_i$ – весовые коэффициенты (для однорядной катушки $S_i = \text{const}$, откуда $h_i = 1/w$).

В случае однорядной катушки средневзвешенная сумма распределений скорости изменения напряжённости по виткам катушки $G_m(x_0)$ равна среднеарифметической сумме распределений. Для многорядной катушки при незначительной разности площади витков катушки в пределах 40 % и большом числе слагаемых средневзвешенная сумма близка к среднеарифметической. Коэффициент преобразования k_1 определим отношением амплитуды E_1 к средневзвешенному значению скорости $G_m(x_0)$ и также выразим через параметры катушки и параметры виброперемещения согласно (5).

Запишем аналитические условия определения коэффициента k_2 :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_{ij}(x(t), y, z)}{\partial x} &= \frac{\partial H(x(t))}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial^2 H_{ij}(x(t), y, z)}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 H(x(t))}{\partial x^2} = G'(x_0) = \text{const}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $G'(x_0)$ – ускорение в точке x_0 по всем элементам площади катушки ΔS_{ij} в пределах размаха колебаний.

Условия (7) соответствуют колебаниям катушки относительно вершины распределений напряжённости поля в виде эквидистантно расположенных парабол.

В этом случае выражение (2) преобразуется к виду

$$e(t) = -0,5 \mu a^2 \omega G'(x_0) w S_m \sin 2\omega t. \quad (8)$$

Из (8) следует, что коэффициент преобразования k_2 определяется отношением амплитуды второй гармоники ЭДС индукции E_2 к $G'(x_0)$:

$$k_2 = \frac{E_2}{G'(x_0)} = \frac{E_2}{2b} = \frac{1}{2} \mu a^2 \omega w S_m, \quad (9)$$

где b – коэффициент пропорциональности уравнения параболы.

В случае зависимости значений коэффициента b от переменных y, z определяется его среднее значение b_m по семейству распределений напряжённости с подстановкой в знаменатель выражения (9).

Соотношение для коэффициентов k_1, k_2 имеет вид

$$k_2 = ak_1/2, \quad (10)$$

что позволяет по известному одному коэффициенту определить другой коэффициент.

Пороговая чувствительность ВИП к величинам $G(x_0), G'(x_0)$ магнитного поля рассеяния дефекта ограничена уровнем неинформативных влияющих факторов. К ним относятся фоновые распределения магнитных полей, создаваемые намагничивающей системой и другими источниками магнитного поля, например, электромагнитным приводом ВИП, а также стохастические магнитные и электрические шумы. Измерительная информация от первичного преобразователя ВИП дифференцируется и анализируется с помощью цифровых фильтров [14] по гармоническим составляющим выходного сигнала, кратным частоте колебаний катушки. В основном это первые две гармоники сигнала ВИП. В связи с этим пороги чувствительности должны устанавливаться по каждой из этих гармоник.

Выражение для порога чувствительности ВИП к $G(x_0)$ имеет вид

$$G(x_0)_{\min 1} = 2\sqrt{2}U_n/k_1 = 2\sqrt{2(U_{\phi 1}^2 + U_{\psi}^2)}/k_1, \quad (11)$$

где U_n – среднеквадратическое значение (СКЗ) неинформативной составляющей сигнала ВИП (помехи); $U_{\phi 1}$ – СКЗ 1-й

гармоники фоновой составляющей сигнала ВИП; U_{ψ} – СКЗ стохастически распределённого шума.

При $U_{\phi 1} \gg U_{\psi}$ порог чувствительности составляет $2E_{\phi 1}/k_1$, где $E_{\phi 1}$ – амплитуда 1-й фоновой гармоники.

Порог чувствительности к $G'(x_0)$ определим аналогично (11) подстановкой k_2 и СКЗ 2-й гармоники $U_{\phi 2}$ фоновой составляющей сигнала ВИП.

Таким образом, для выделения информативных составляющих сигнала ВИП на фоне помех необходимо выполнение следующих условий:

$$G(x_0) \geq G(x_0)_{\min}; \quad G'(x_0) = 2b \geq G'(x_0)_{\min}.$$

Экспериментальные методы. Ввиду ограничений, обусловленных сложностью конструктивного совмещения ВИП с существующими типами мер градиента напряжённости постоянного магнитного поля, коэффициент преобразования k_1 оценивали с помощью экспериментальной установки [10] на основании выражения (5) путём измерений G, E_1 .

Напряжённость воспроизводимого магнитного поля измеряли миллитесламетром ТПУ-01 (предел относительной погрешности не более 3 %), амплитудные и пиковые значения сигнала ВИП – мультиметром 3458A (предел относительной погрешности не более 0,1 %). Расстояние между точками отсчёта напряжённости поля определяли многооборотным индикатором часового типа ИЧ-25 (предел абсолютной погрешности 0,03 мм), закреплённым на каретке координатного стола. Амплитуду колебаний катушки ВИП находили с помощью разработанного оптоэлектронного измерителя размаха колебаний. Погрешность измерений амплитуды по результатам калибровки составила 0,02 мм.

На рис. 2 показано семейство квазилинейных пространственных распределений нормальной составляющей напряжённости магнитного поля по координате x в границах реальных размеров катушки ВИП, отвечающее условию (3) на отрезках длиной 10 мм. Семейство получено измерением напряжённости поля над поверхностью плоского бездефектного контрольного образца ($150 \times 30 \times 7$ мм) на участке длины образца 30–50 мм, установленного на полюсах магнитной системы. Распределения 2, 6 измерены вдоль центральной оси образца с зазором (координата z) соответственно 1 и 3 мм, распределения 1, 3–5 получены со смещением от центральной оси образца на ± 3 мм по координате y при тех же значениях зазора.

Из анализа представленных распределений следует, что по совокупности распределений отклонение скорости изменения напряжённости от среднего значения на любом отрезке длиной 10 мм не превышает 1–2 %, что соизмеримо с погрешностью измерений напряжённости. При этом коэффициент гармоник, характеризующий нелинейность распределений, находится в пределах 0,02. Приведённые данные свидетельствуют о практическом выполнении условия (3) и возможности оценки k_1 по результатам измерений величин G, E_1 .

Значение G определяли как отношение разности напряжённости на двух отдельных участках распределений 30–40 мм и 40–50 мм к длине этих участков в нескольких сериях опытов. Нормально ориентированную цилиндрическую

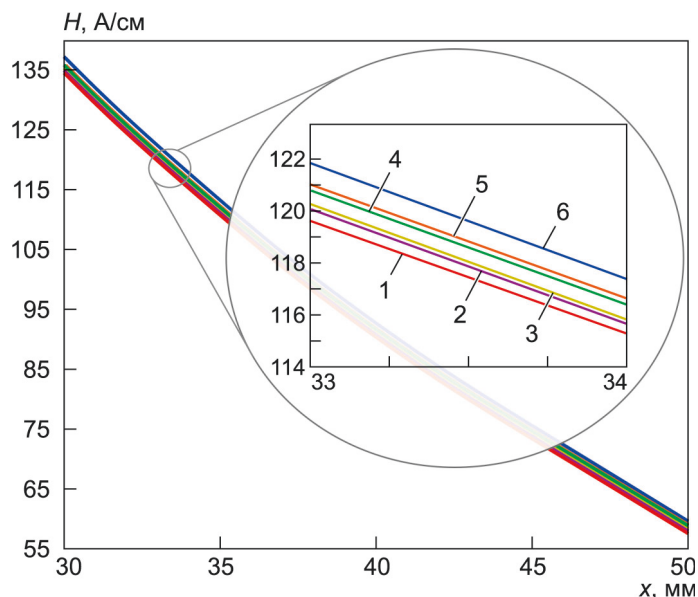


Рис. 2. Распределения нормальной составляющей напряжённости H поля по координате x на участке 30–50 мм бездефектного контрольного образца:

1, 3–5 – со смещением от центральной оси по координате y на ± 3 мм при зазоре соответственно 1 и 3 мм; 2, 6 – вдоль центральной оси образца с зазором соответственно 1 и 3 мм

Fig. 2. Distribution of the normal component H of the field strength along the x coordinate in a 30–50 mm section of a defect-free control sample: 1, 3–5 – offset from the central axis on the y coordinate by ± 3 mm with a gap of 1 mm and 3 mm, respectively; 2, 6 – along the central axis of the sample with a gap of 1 mm and 3 mm, respectively

катушку (наружный диаметр 5 мм), намотанную на каркас диаметром 4 мм, шириной намотки по основанию каркаса 2,2 мм и числом витков 100, устанавливали по центру соответствующего участка распределения с зазором 1 мм. Значение E_1 определяли измерением ЭДС индукции при амплитуде колебаний катушки 2,3 мм на частоте 150 Гц. По экспериментальным данным в серии опытов оценка k_1 составила $(0,038 \pm 0,002)$ мВ/(А/см²). При оценке чувствительности в единицах магнитной индукции G целесообразно определять в [мТл/мм], т. е. с учётом единицы измерения амплитуды колебаний. Для рассматриваемого примера k_1 в принятых единицах составляет $(3,04 \pm 0,16)$ мВ/(мТл/мм).

Как следует из (5), при заданных параметрах катушки чувствительность можно регулировать как изменением амплитуды, так и изменением частоты виброперемещения катушки. В связи с неравномерностью амплитудно-частотной характеристики преобразования управляющего напряжения в амплитуду колебаний катушки [15], сплошность поверхности целесообразно контролировать посредством ВИП при постоянной частоте виброперемещения, задавая требуемую рабочую амплитуду колебаний. Чувствительность k_{1p} при рабочей амплитуде a_p найдём как

$$k_{1p} = k_1 a_p / a,$$

где k_1 – экспериментально полученное значение чувствительности при амплитуде a .

Расчётную оценку чувствительности k_1 выполняли подстановкой значений соответствующих параметров в (5). Точность оценки зависит от точности определения средней площади

витка катушки S_m . При неравномерной многорядной намотке оценка S_m , рассчитанная по среднему диаметру катушки, даёт завышенный результат по сравнению с экспериментальной оценкой. В частности, для использованной в эксперименте катушки (средний диаметр 4,5 мм) расчётная оценка чувствительности превышает экспериментальную на 13 %. Как показывает расчёт, выполненный подстановкой в (5) экспериментально полученной оценки чувствительности, фактический средний диаметр данной катушки равен 4,2 мм. В этом случае расхождение между расчётной и экспериментальной оценками составляет доли процента.

Для точной экспериментальной оценки коэффициента чувствительности k_2 необходимо воспроизведение поля, отвечающего условиям (7), что представляет сложную техническую задачу. Приближённую оценку вычисляли по результату измерения амплитуды второй гармоники сигнала ВИП и результату усреднения коэффициента b по трём распределениям тангенциальной составляющей (b_I , b_{II} , b_{III}) напряжённости поля. Измерения выполняли над центром поперечной щелевой прорези глубиной 3 мм, раскрытием 0,1 мм плоского контрольного образца (150×30×7) мм в точке $x_0=90$ мм вдоль центральной оси образца. Расстояние от поверхности образца до центра преобразователя Холла (координата z) составляло 3; 4; 5 мм. Кривые распределений представлены на рис. 3, где $x^* = x - x_0$. Амплитудные значения виброперемещения катушки 0,58 и 1,16 мм, установленной с рабочим зазором 2 мм, задавали из условия её колебаний на параболическом участке распределений для получения двух значений коэффициента преобразования. Оценки коэффициента преобразования k_2 составили соответственно 0,24 мВ/(мТл/мм²) и 0,91 мВ/(мТл/мм²). Проверка адекватности расчётных оценок (9), (10) экспериментальным показала, что максимально различие составляет 10 %.

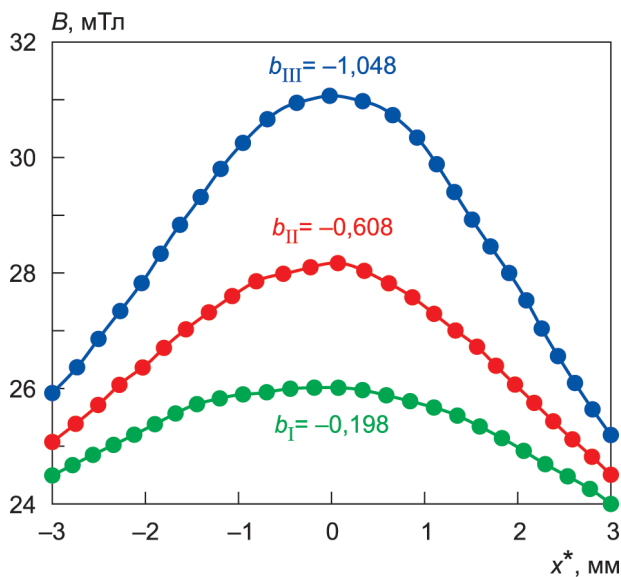


Рис. 3. Распределения тангенциальной составляющей B напряжённости магнитного поля над дефектом при зазоре 3 мм (b_{III}), 4 мм (b_{II}) и 5 мм (b_I)

Fig. 3. A family of distributions of the tangential component B of the magnetic field strength over the defect at a gap of 3 mm (b_{III}), 4 mm (b_{II}) and 5 mm (b_I)

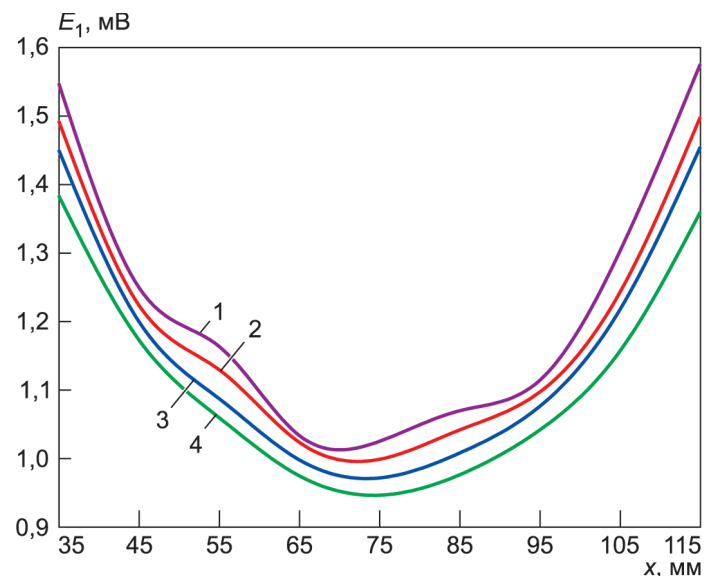


Рис. 4. Распределения амплитудных значений фоновой гармоники E_1 при рабочих зазорах 0; 2; 4; 6 мм (соответственно 1–4)

Fig. 4. Distributions of the amplitude values of the background harmonic E_1 at working gaps of 0; 2; 4 and 6 mm (curves 1, 2, 3 and 4, respectively)

С учётом выполненной проверки и трудоёмкости получения экспериментальной оценки расчётный метод более предпочтителен для катушек с известной площадью сечения.

Пороги чувствительности оценивали, анализируя и измеряя уровни неинформативных составляющих сигнала ВИП в зоне контроля. Измеренное СКЗ собственных шумов при вибрации катушки на частоте 150 Гц с амплитудой 2,3 мм составило $U_{\text{ш}} = 6 \dots 8$ мкВ. Результаты измерений амплитуды 1-й фоновой гармоники при колебаниях нормальной катушки ВИП над бездефектным контрольным образцом представлены графиками на рис. 4 при изменении рабочего зазора в диапазоне 0–6 мм с шагом 2 мм. Амплитудное значение максимально на границах зоны контроля 35–115 мм и минимально в центре. Расчёт порога чувствительности к $G(x_0)$ по максимальному значению $E_{\text{ф1}}$ на основании (11) даёт результат $G_{\text{min1}} = 1,04$ мТл/мм. Отсюда следует, что для распределений нормальной составляющей напряжённости магнитного поля дефекта, тангенс угла наклона которых вблизи центра дефекта больше порога чувствительности, выявление дефектов типа трещины возможно с вероятностью более 0,5. Например, при контроле по нормальной составляющей дефекты глубиной 1–4 мм раскрытием 0,1 мм надежно выявляются при рабочем зазоре 4–8 мм [8].

Порог чувствительности к $G'(x_0)$, определяемый по максимуму амплитуды 2-й фоновой гармоники на границах расширенной зоны контроля от 20 до 130 мм, составляет $G'(x_0)_{\text{min}} = 2b_{\text{min}} = 0,22$ мТл/мм², откуда $b_{\text{min}} = 0,11$ мТл/мм². Это означает, что при контроле сплошности поверхности образца по тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля с амплитудой колебаний катушки 2,3 мм будут выявляться распределения над щелевым дефектом, коэффициент пропорциональности уравнения которых $b > b_{\text{min}}$. В частности, выявляются все распределения, показанные на рис. 3. При контроле нарушения сплошности на центральном участке образца значение порогов чувствительности снижается до двух раз.

Преимущество экспериментальных методов оценки характеристик чувствительности ВИП по сравнению с расчётными состоит в том, что отсутствует необходимость учёта геометрии, способа намотки и параметров катушки. Вместе с тем в отличие от расчётного метода необходимы затраты на проведение измерений. Для цилиндрических катушек с относительно равномерной намоткой проволоки предпочтительнее расчётный метод, дающий хорошее приближение и не требующий затрат.

Заключение. Рассмотренные методы оценки характеристик чувствительности ВИП позволяют обоснованно устанавливать требования к параметрам катушки преобразователя и режиму виброперемещения в зависимости от требований к уровню выходного сигнала ВИП, а также к порогам реагирования вторичной дефектоскопической аппаратуры в зависимости от заданного уровня фиксации дефектов. Прикладное значение заключается в методическом обеспечении вопросов нормирования и контроля характеристик ВИП, решения задач идентификации магнитных полей над дефектами по амплитудно-фазовому спектру сигнала, а также при выполнении дефектометрических оценок.

Список литературы

1. Бакунов А. С., Горкунов Э. С., Щербинин В. Е. Магнитный контроль: учебное пособие для подготовки специалистов по неразрушающему контролю и технической диагностике. М.: Издательский дом «Спектр», 2011. 192 с. <https://www.elibrary.ru/qmhcbv>
2. Реутов Ю. Я., Щербинин В. Е., Волков А. В. Возможности выбора преобразователей магнитного поля для дефектоскопии // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 72–84. <https://www.elibrary.ru/tqlheh>
3. Dehui W., Lingxin S., Xiaohong W., Zhitian L., *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2017, vol. 36, 24. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0396-6>
4. Shi Y., Zhang C., Li R., Cai M., Jia G., *Sensors*, 2015, vol. 15(12), pp. 31036–31055. <https://doi.org/10.3390/s151229845>
5. Azad A., Kim N., *Sensors*, 2019, vol. 19(22), 4869. <https://doi.org/10.3390/s19224869>
6. Wu J., Fang H., Huang X., Xia H., Kang Y., Tang C., *Sensors*, 2017, vol. 17(12), 2911. <https://doi.org/10.3390/s17122911>
7. Peng X., Anyaoha U., Liu Z., Tsukada K., in *IEEE Transactions on Magnetics*, June 2020, vol. 56, no. 6, pp. 1–15, Art no. 6200315. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2020.2981450>
8. Пастушенков А. Г. Измерительные преобразователи. Часть 1. Гальваномагнитные и индукционные преобразователи: учебное пособие. Тверь: Тверской гос. ун-т, 2001. 95 с.
9. Николаев Ю. Л., Шкатов П. Н., Чернова А. В., Саморуков А. А. Моделирование и гармонический анализ сигнала виброиндукционного преобразователя при его перемещении над намагниченным участком с поверхностной трещиной // Приборы. 2019. № 4. С. 17–25. <https://www.elibrary.ru/ugztzy>
10. Николаев Ю. Л., Шкатов П. Н., Ахметшина Э. Ф., Саморуков А. А. Математическое описание и анализ сигнала виброиндукционного преобразователя при воздействии нормальной составляющей магнитных потоков рассеяния над дефектным участком // Дефектоскопия. 2021. № 7. С. 19–27.
11. Чернова А. В., Николаев Ю. Л., Шкатов П. Н., Прилепко М. Ю. Обнаружение и исследование аномалий магнитных полей над поверхностными дефектами сложнопрофильных деталей // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 46–52. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-46-52>
12. Саморуков А. А., Николаев Ю. Л., Борисенко А. А., Исаев Е. В. Двухкомпонентный виброиндукционный преобразователь для магнитной дефектоскопии // Законодательная и прикладная метрология. 2022. № 1. С. 38–41. <https://www.elibrary.ru/btwptp>
13. Николаев Ю. Л., Ахметшина Э. Ф., Саморуков А. А., Чернова А. В. Оценка соотношения информативного и фонового сигналов при регистрации магнитных полей поверхностных дефектов магнитоизмерительными преобразователями // Измерительная техника. 2020. № 5. С. 43–49. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-05-43-49>
14. Смирнов А. В. Оптимизация характеристик цифровых фильтров одновременно в частотной и временной областях // Российский технологический журнал. 2020. № 6. С. 63–77.

15. Чернова А. В., Саморуков А. А., Борисенко А. А., Исаев Е. В. Индукционный магнитоизмерительный преобразователь с электродинамическим приводом виброперемещения // Инновационные технологии в электронике и приборостроении: сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием Физико-технологического института РТУ МИРЭА, Москва, Россия, 16–17 апреля 2020. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2020. С. 252–255.

References

1. Bakunov A. S., Gorkunov Je. S., Shcherbinin V. E., *Magnitnyj kontrol' [Magnetic inspection]*, Moscow, Spektr Publ., 2011, 192 p. (In Russ.)
2. Reutov Y. Y., Shcherbinin V. E., Volkov A. V., *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, pp. 760–768. <https://doi.org/10.1134/S1061830914120080>
3. Dehui W., Lingxin S., Xiaohong W., Zhitian L., *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2017, vol. 36, 24. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0396-6>
4. Shi Y., Zhang C., Li R., Cai M., Jia G., *Sensors*, 2015, vol. 15(12), pp. 31036–31055. <https://doi.org/10.3390/s151229845>
5. Azad A., Kim N., *Sensors*, 2019, vol. 19(22), 4869. <https://doi.org/10.3390/s19224869>
6. Wu J., Fang H., Huang X., Xia H., Kang Y., Tang C., *Sensors*, 2017, vol. 17(12), 2911. <https://doi.org/10.3390/s17122911>
7. Peng X., Anyaoha U., Liu Z., Tsukada K., in *IEEE Transactions on Magnetics*, June 2020, vol. 56, no. 6, pp. 1–15, Art no. 6200315. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2020.2981450>
8. Pastushenkov A. G., *Izmeritel'nye preobrazovateli. Chast' 1. Gal'vanomagnitnye i indukcionnye preobrazovateli. Uchebnoe*

posobie. [Measuring transducers. Part 1. Galvanomagnetic and induction converters. Study guide], Tver, Tver State University, 2001, 95 p. (In Russ.)

9. Nikolaev Ju. L., Shkatov P. N., Chernova A. V., Samorukov A. A., Modelling and harmonic analysis of a vibrating induction transducer signal due to its movement over a magnetized area with a surface crack, *Instruments*, 2019, no. 4, pp. 17–25. (In Russ.)

10. Nikolaev Ju. L., Shkatov P. N., Ahmetshina Je. F., Samorukov A. A., *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2021, vol. 57, no. 7, pp. 561–569.

<https://doi.org/10.1134/S106183092107010X>

11. Chernova A. V., Nikolaev Yu. L., Shkatov P. N., Prilepko M. Y., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 10, pp. 838–844. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02012-9>

12. Samorukov A. A., Nikolaev Ju. L., Borisenko A. A., Isaev E. V., Two-component vibration induction sensor for magnetic flaw detection, *Zakonodatel'naja i prikladnaja metrologija [Legal and Applied Metrology]*, 2022, no. 1, pp. 38–41. (In Russ.)

13. Nikolaev Yu. L., Akhmetshina E. F., Samorukov A. A., Chernova A. V., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 5, pp. 375–382. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01798-w>

14. Smirnov A. V., *Russian Technological Journal*, 2020, vol. 8, no. 6, pp. 63–67. (In Russ.)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-63-77>

15. Borisenko A. A., Chernova A. V., Samorukov A. A., Isaev E. V. *Induction magnetic measuring transducer with electrodynamic moving-coil actuator of vibrodisplacement*, Collection of reports of the Russian Scientific and Practical (Technical) Conference with international participation of Russian State Technological University (RTU MIREA): Innovative technologies in electronics and instrumentation, 16–17 April, 2020, Moscow, MIREA – Russian Technological University Publ., 2020, pp. 252–255. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 14.04.2022; одобрена после рецензирования 28.06.2022; принята к публикации 16.09.2022.
The article was submitted 14.04.2022; approved after reviewing 28.06.2022; accepted for publication 16.09.2022.

Восстановление сигналов по амплитуде спектра

Илья Владимирович Бойков^{1✉}, Анастасия Александровна Пивкина²

^{1, 2} Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия

¹i.v.boikov@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-6980-933X>

²nastyashaldaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7188-9159>

Аннотация. Предложен двухэтапный приближённый метод восстановления фазы спектра сигнала по амплитуде спектра. На первом этапе численным методом восстанавливается сигнал (в одномерном и двумерном случаях) по известному модулю спектра, на втором – определяется спектр восстановленного сигнала и вычисляется фаза спектра. Восстановление сигнала по известному модулю спектра моделируется нелинейным уравнением Фредгольма первого рода, при решении которого использованы сплайн-коллокационный метод со сплайнами нулевого и первого порядков и обобщение непрерывного метода решения нелинейных операторных уравнений. Приведены модельные примеры восстановления одномерных и двумерных сигналов. Исследована точность восстановления сигнала при различных возмущениях во входных сигналах и в вычислительных схемах. Оценены абсолютные и относительные значения выбросов на переднем и заднем фронтах сигналов. Рассмотрены способы подавления эффекта Гиббса. Предложенный метод можно применять в оптике, астрофизике, биологии, медицине.

Ключевые слова: восстановление сигнала, амплитудно-фазовая проблема, нелинейное уравнение Фредгольма первого рода, метод регуляризации, непрерывный метод решения операторных уравнений

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Пензенского государственного университета (конкурс исследовательских проектов «Ректорские гранты», договор № ХП-221/22 от 31.03.2022).

Для цитирования: Бойков И. В., Пивкина А. А. Восстановление сигналов по амплитуде их спектра // Измерительная техника. 2022. № 10. С. 44–52. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-44-52>

Signals recovery by the amplitude of its spectrum

Iliya V. Boikov^{1✉}, Anastasia A. Pivkina²

^{1, 2} Penza State University, Penza, Russia

¹i.v.boikov@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-6980-933X>

²nastyashaldaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7188-9159>

Abstract. A two-stage approximate method for reconstructing the phase of the signal spectrum from the amplitude of the spectrum is proposed. At the first stage, the signal is reconstructed by a numerical method (in one-dimensional and two-dimensional cases) from the known modulus of the spectrum; at the second stage, the spectrum of the reconstructed signal is determined and the phase of the spectrum is calculated. Signal recovery from a known modulus of the spectrum is modeled by a nonlinear Fredholm equation of the first kind, which is solved using the spline-collocation method with splines of zero and first orders and a generalization of the continuous method for solving nonlinear operator equations. Model examples of restoration of one-dimensional and two-dimensional signals are given. The accuracy of signal reconstruction under various perturbations in the input signals and in computational circuits has been studied. The absolute and relative values of spikes at the leading and trailing edges of the signals are estimated. Methods for suppressing the Gibbs effect are considered. The proposed method can be used in optics, astrophysics, biology, and medicine.

Keywords: signal recovery, amplitude-phase problem, nonlinear Fredholm integral equation of the first kind, regularization method, continuous method for solving operator equations

Financial Support: the work was supported by Penza State University (competition of research projects “Rector’s grants” under Grant no. ХП-221/22 on 31.03.2022).

Введение. При решении многочисленных задач в измерительной технике, автоматике, физике, биологии, медицине не возникают ситуации, когда измерениям доступны только амплитуды спектров сигналов. Определение амплитуды спектра по фазе спектра сигнала и фазы спектра по амплитуде спектра сигнала является амплитудно-фазовой проблемой. Решению этой проблемы посвящено большое число работ, в которых предложены различные аналитические

и численные методы, например [1–6]. В работах [1–3] для приближённого решения амплитудно-фазовой проблемы применяется аппарат нелинейных сингулярных интегральных уравнений (одномерный случай) и нелинейных бисингулярных интегральных уравнений (двумерный случай).

Проблема восстановления одномерных и двумерных функций по известным амплитудам спектров моделируется одномерными и двумерными интегральными уравнениями

Фредгольма первого рода. Известно [7], что решение интегральных уравнений Фредгольма первого рода является некорректной по Адамару задачей, т. е. небольшие вариации в ядрах и правых частях уравнений могут привести к большим погрешностям решений. Поэтому необходимо разрабатывать соответствующие методы регуляризации. В настоящей работе в качестве алгоритма регуляризации использован непрерывный метод решения нелинейных операторных уравнений [8]. Этот метод основан на теории Ляпунова устойчивости решений дифференциальных уравнений. Согласно этому методу исходной системе алгебраических уравнений (линейных и нелинейных) ставится в соответствие асимптотически устойчивая система обыкновенных дифференциальных уравнений, что обеспечивает сходимость и устойчивость метода при возмущениях коэффициентов уравнений и правых частей. Восстановив исходную функцию и вычислив преобразование Фурье этой функции, можно найти фазу спектра.

Цель настоящей статьи – построение приближённых методов восстановления одномерных и двумерных сигналов по известным амплитудам спектров.

Непрерывный метод решения нелинейных операторных уравнений. Приведём обозначения и определения, используемые далее в статье. Пусть B – банахово пространство; K – оператор, действующий из B в B , $B(a, r) = \{x, a \in X: \|x - a\| \leq r\}$ – шар в банаховом пространстве B ; a, r – центр и радиус шара; $\Lambda(K) = \lim_{v \downarrow 0} (\|I + vK\| - 1)/v$ – логарифмическая норма [9] линейного оператора K ; I – единичный оператор в банаховом пространстве. Символ $v \downarrow 0$ означает, что вещественная переменная v стремится к нулю, убывая.

Опишем формулы для вычисления логарифмических норм в часто используемых банаховых пространствах.

Пусть $C = \{c_{ij}\}$, $i, j = \overline{1, n}$ – вещественная матрица в n -мерном пространстве R_n векторов $x = (x_1, \dots, x_n)$ с нормами $\|x\|_1 = \sum_{k=1}^n |x_k|$; $\|x\|_2 = \left[\sum_{k=1}^n |x_k|^2 \right]^{1/2}$; $\|x\|_3 = \max_{1 \leq k \leq n} |x_k|$. Логарифмические нормы матрицы C определяется как [10]:

$$\Lambda_1(C) = \max_j \left(c_{jj} + \sum_{i=1, i \neq j}^n |c_{ij}| \right); \quad \Lambda_2(C) = \lambda([C + C^*]/2)_{\max};$$

$$\Lambda_3(C) = \max_i \left(c_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |c_{ij}| \right),$$

где $\lambda([C + C^*]/2)_{\max}$ – наибольшее собственное значение матрицы $[C + C^*]/2$; C^* – матрица, сопряжённая с матрицей C .

Рассмотрим в банаховом пространстве B нелинейное уравнение

$$A(x) - f = 0, \quad (1)$$

где $A: B \rightarrow B$ – нелинейный оператор, отображающий пространство B в себя.

Будем считать, что нелинейный оператор $A(x)$ имеет производную Фреше или Гато.

Оператор $A(x)$ называется дифференцируемым по Фреше в точке $x \in B$, если в окрестности этой точки для любого $u \in B$ выполняется равенство $\|A(x+u) - A(x) - A'(x)u\| = \|\beta(x, u)\|$, причём $\lim_{\|u\| \rightarrow 0} \frac{\|\beta(x, u)\|}{\|u\|} = 0$ [11]. Линейный оператор $A'(x)$ называется производной Фреше (сильной производной) оператора $A(x)$ в точке $x \in B$. Оператор $A(x)$ называется дифференцируемым по Гато в точке $x \in B$, если для любого $u \in B$ выполняется равенство $\lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{A(x+\lambda u) - A(x)}{\lambda} = A'(x)$ [11]. Определённый таким образом линейный оператор $A'(x)$ называется производной Гато (слабой производной) оператора $A(x)$ в точке $x \in B$. Производные Фреше и Гато обозначаются одним и тем же символом. Если существует производная Фреше, то существует и производная Гато, и они равны.

Если операторное уравнение (1) является системой нелинейных алгебраических уравнений, то определения производных Гато и Фреше совпадают с определением якобиана.

Уравнению (1) поставим в соответствие задачу Коши

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = A(x(t)) - f; \\ x(t_0) = x_0. \end{cases} \quad (2)$$

Приведём следующие утверждения.

Теорема 1 [8]. Пусть уравнение (1) имеет решение x^* и на любой дифференцируемой кривой $g(t)$, расположенной в банаховом пространстве B , выполняется неравенство

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t - t_0} \int_{t_0}^t \Lambda[A'(g(\tau))] d\tau \leq -\alpha_g, \quad (3)$$

где некоторая величина $\alpha_g > 0$.

Тогда решение задачи Коши (2) при $t \rightarrow \infty$ сходится к решению x^* уравнения (1) при любом начальном значении $x_0 \in B$.

Теорема 2 [8]. Пусть уравнение (1) имеет решение x^* и на любой дифференцируемой кривой $g(t)$, расположенной в шаре $B(x^*, r)$, $r > 0$, удовлетворяются следующие условия:

- 1) при любом $t \geq t_0$ справедливо неравенство $\int_{t_0}^t \Lambda[A'(g(\tau))] d\tau \leq 0$;
- 2) выполняется неравенство (3).

Тогда решение задачи Коши (2) при $t \rightarrow \infty$ сходится к решению x^* уравнения (1) при любом начальном значении $x(t_0) \in B(x^*, r)$.

Замечание. Константа α_g в теоремах 1, 2 зависит от кривой g . Общим является требование $\alpha_g > 0$ для каждой кривой $g(t)$.

Если условия теорем 1, 2 не выполняются, то уравнению (1) поставим в соответствие задачу Коши

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = -\alpha x(t) - [A'(x(t))]^* [A(x(t)) - f]; \\ x(t_0) = x_0, \end{cases} \quad (4)$$

где $[A'(x(t))]^*$ – оператор, сопряжённый с оператором $A'(x(t))$.

По аналогии с доказательствами теорем 1, 2 доказываются следующие теоремы 3, 4.

Теорема 3. Пусть уравнение (1) имеет решение x^* и на любой дифференцируемой кривой $q(t)$ в пространстве B выполняется условие

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t-t_0} \int_{t_0}^t \Lambda \left\{ [A'(q(\tau))]^* A'(q(\tau)) \right\} d\tau \geq \alpha_q, \quad (5)$$

где $\alpha_q > 0$.

Тогда решение задачи Коши (4) сходится при $t \rightarrow \infty$ к решению x^* уравнения (1) при любом начальном приближении $x(t_0) \in B$.

Теорема 4. Пусть уравнение (1) имеет решение x^* и на любой дифференцируемой кривой $q(t)$, расположенной в шаре $B(x^*, r)$, $r > 0$, соблюдаются следующие условия:

1) справедливо неравенство $\int_{t_0}^t \Lambda \left\{ [A'(q(\tau))]^* A'(q(\tau)) \right\} d\tau \geq 0$;

2) выполняется неравенство (5).

Тогда решение задачи Коши (4) сходится при $t \rightarrow \infty$ к решению x^* уравнения (1) при любом начальном приближении $x(t_0) \in B(x^*, r)$.

Если условия теорем 3, 4 не выполняются, то необходимо ввести регуляризующий параметр $\alpha > 0$ и перейти к задаче Коши

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= -\alpha x(t) - [A'(x(t))]^* [A(x(t)) - f]; \\ x(t_0) &= x_0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Можно показать, что задача Коши (6) при любом начальном приближении $x(t_0) \in B$ сходится к решению уравнения

$$\alpha x(t) + (A'(x))^* (A(x) - f) = 0.$$

При восстановлении сигналов задачи Коши (2), (4), (6) решаются численными методами. При этом можно использовать любой численный метод решения дифференциальных уравнений [12].

Далее при решении модельных примеров применён модифицированный метод Эйлера. Пусть операторное уравнение (1) является n -мерной системой нелинейных алгебраических уравнений. Рассмотрим задачу Коши (2). Вычисления проведём по итерационной схеме

$$x(m+1) = x(m) + hG(m)[A(x(m)) - f],$$

$$m = m_0, m_0 + 1, \dots; x(m_0) = x_0,$$

где h – шаг метода Эйлера; $G(m)$ – диагональная матрица, элементы $\gamma_{ii}(m) = \pm 1$ которой подбираются таким образом, чтобы логарифмическая норма матрицы $G(m)A'(x(m))$ была отрицательной.

Методы восстановления сигналов.

Одномерный сигнал. Пусть $f(t)$, $t \in [0, a]$ – сигнал, подлежащий восстановлению. Требуется восстановить

функцию $f(t)$, если известно, что амплитуда её спектра $A(\omega) = |F(\omega)|$, $-\infty < \omega < \infty$, где $F(\omega)$ – фурье-преобразование функции $f(t)$.

Для восстановления функции $f(t)$ решим нелинейное интегральное уравнение

$$\left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^a f(t) e^{i\omega t} dt \right| = A(\omega), \quad -\infty < \omega < \infty. \quad (7)$$

Для приближённого решения уравнения (7) построим сплайн-коллокационные вычислительные схемы со сплайнами нулевого и первого порядков.

Первая вычислительная схема. Введём узлы

$$t_k = ak/N, \quad k = \overline{0, N}; \quad \bar{t}_k = (t_k + t_{k+1})/2, \quad k = \overline{0, N-1};$$

$$\omega_k = -D + 2Dk/N, \quad k = \overline{0, N}; \quad \bar{\omega}_k = (\omega_k + \omega_{k+1})/2, \quad k = \overline{0, N-1}$$

и интервалы

$$\Delta_k = [t_k, t_{k+1}), \quad k = \overline{0, N-2}, \quad \Delta_{N-1} = [t_{N-1}, t_N].$$

Здесь D – достаточно большое число, определяемое неравенством

$$\max_{\omega \in (-\infty, -D) \cup (D, \infty)} A(\omega) \leq N^{-1}.$$

Приближённое решение уравнения (7) будем искать в виде кусочно-постоянной функции

$$x_N(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k \psi_k(t),$$

где

$$\psi_k(t) = \begin{cases} 1, & t \in \Delta_k \\ 0, & t \in [0, a] \setminus \Delta_k \end{cases}; \quad l = \overline{0, N-1}.$$

Неизвестные коэффициенты $\{\alpha_k\}$ определим из системы уравнений

$$\left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k \int_{\Delta_k} f(t) e^{i\omega_l t} dt \right| = A(\omega_l); \quad l = \overline{0, N-1}. \quad (8)$$

Для численной реализации системы уравнений (8) воспользуемся непрерывным методом решения нелинейных операторных уравнений. Значения $\{\alpha_k\}$ найдём из системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{d\alpha_l(u)}{du} = G(u) \left(\left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{j=0}^{N-1} \alpha_j(u) \int_{\Delta_j} e^{i\omega_l t} dt \right| - A(\omega_l) \right); \quad (9)$$

$$\alpha_l(u_0) = \bar{\alpha}_l, \quad l = \overline{0, N-1}. \quad (10)$$

Систему (9)–(10) решим модифицированным методом Эйлера:

$$\alpha_l(n+1) = \alpha_l(n) + G(n)h \left(\left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{j=0}^{N-1} \alpha_j(n) \int_{\Delta_j} e^{i\omega_l t} dt \right| - A(\omega_l) \right);$$

$$\alpha_l(0) = \overline{\alpha_l}, \quad l = 0, N-1.$$

где диагональная матрица $G(n)$ должна быть такой, чтобы логарифмическая норма $\Lambda(G(n)J(n))$ была отрицательной в соответствующем пространстве N -мерных векторов; $J(n)$ –

якобиан вектора $\left(\left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{j=0}^{N-1} \alpha_j(n) \int_{\Delta_j} e^{i\omega_l t} dt \right| - A(\omega_l) \right)_{l=0}^{N-1}$.

Диагональная матрица $G(n)$ подбирается таким образом, чтобы система (9) была асимптотически устойчивой.

Аналогичным образом строятся вычислительные схемы решения задач Коши (4), (6).

Вторая вычислительная схема. Приближённое решение уравнения (7) найдём сплайн-коллокационным методом со сплайнами первого порядка.

Приближённое решение имеет вид полигона

$$x_N(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k \psi_k(t)$$

с базисными функциями

$$\psi_0(t) = 1 - tn/a, \quad 0 \leq t \leq a/n;$$

$$\psi_1(t) = \begin{cases} tn/a, & 0 \leq t \leq a/n; \\ 2 - tn/a, & a/n \leq t \leq 2a/n; \end{cases}$$

$$\psi_k(t) = \begin{cases} -k + 1 + tn/a, & (k-1)a/n \leq t \leq ka/n; \\ k + 1 - tn/a, & ka/n \leq t \leq (k+1)a/n, \end{cases}$$

$$k = \overline{2, n-1};$$

$$\psi_n(t) = -n + 1 + tn/a, \quad (n-1)a/n \leq t \leq a.$$

Коэффициенты $\{\alpha_k\}$ найдём из системы уравнений

$$\left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k \int_0^a \psi_k(t) e^{i\omega_l t} dt \right| = A(\omega_l); \quad l = \overline{0, N-1}. \quad (11)$$

Введем функцию $g(k, l) = \int_0^a \psi_k(t) e^{i\omega_l t} dt$ и после элементарных вычислений получим

$$g(0, l) = \int_0^{a/n} \psi_0(t) e^{i\omega_l t} dt =$$

$$= \frac{n}{a\omega_l^2} \left(1 - \cos \frac{a\omega_l}{n} \right) + \frac{i}{\omega_l} \left(1 - \frac{n}{a\omega_l} \sin \frac{a\omega_l}{n} \right);$$

$$g(1, l) = \int_0^{a/n} \psi_1(t) e^{i\omega_l t} dt =$$

$$= \frac{n}{a\omega_l^2} \left[2 \cos \frac{a\omega_l}{n} - \cos \frac{2a\omega_l}{n} - 1 + i \left(2 \sin \frac{a\omega_l}{n} - \sin \frac{2a\omega_l}{n} \right) \right];$$

$$g(k, l) = \int_{(k-1)a/n}^{(k+1)a/n} \psi_k(t) e^{i\omega_l t} dt = \frac{-2n}{a\omega_l^2} \left[\cos \frac{ak\omega_l}{n} \cos \frac{a\omega_l}{n} - \right.$$

$$\left. - \cos \frac{ak\omega_l}{n} + i \left(\sin \frac{ak\omega_l}{n} \cos \frac{ak\omega_l}{n} - \sin \frac{ak\omega_l}{n} \right) \right];$$

$$g(n, l) = \int_{(n-1)a/n}^a \psi_n(t) e^{i\omega_l t} dt =$$

$$= \frac{-1}{a\omega_l^2} \left[n \cos a\omega_l \cos \frac{a\omega_l}{n} + n \sin a\omega_l \sin \frac{a\omega_l}{n} - \right.$$

$$\left. - a\omega_l \sin a\omega_l - a\omega_l \cos a\omega_l + i \left(n \sin a\omega_l \cos \frac{a\omega_l}{n} - \right. \right.$$

$$\left. \left. - n \cos a\omega_l \sin \frac{a\omega_l}{n} + a\omega_l \cos a\omega_l - n \sin a\omega_l \right) \right].$$

Подставив эти значения в уравнение (11), получим систему нелинейных алгебраических уравнений, аппроксимирующих поставленную задачу (система здесь не приведена из-за её громоздкости). Система реализуется непрерывным методом решения нелинейных операторных уравнений по аналогии с первой вычислительной схемой.

После восстановления сигнала $f(t)$, $t \in [0, a]$, вычислим его фазу. Для этого найдём преобразование Фурье $F_n(\omega)$ функции $f_n(t)$, аппроксимирующей функцию $f(t)$. Представим $F_n(\omega)$ в виде $F_n(\omega) = U_n(\omega) + iV_n(\omega)$ и определим фазу спектра сигнала $f(t)$ по формуле $\varphi_n(\omega) = \arctg[V_n(\omega)/U_n(\omega)]$.

Двумерный сигнал. Постановка задачи. Пусть $f(t_1, t_2)$, $(t_1, t_2) \in [0, a]^2$ – сигнал, подлежащий восстановлению. Требуется восстановить функцию $f(t_1, t_2)$, располагая информацией о модуле её спектра $A(\omega_1, \omega_2) = |F(\omega_1, \omega_2)|$, где $F(\omega_1, \omega_2)$ – преобразование Фурье функции $f(t_1, t_2)$. Таким образом, задача сводится к решению нелинейного интегрального уравнения Фредгольма

$$\left| \frac{1}{2\pi} \int_0^a \int_0^a f(t_1, t_2) e^{i(\omega_1 t_1 + \omega_2 t_2)} dt_1 dt_2 \right| = A(\omega_1, \omega_2). \quad (12)$$

Уравнение (12) решим сплайн-коллокационным методом со сплайнами нулевого порядка. Приближённое решение уравнения (12) найдём в виде кусочно-постоянной функции

$$f_n(t_1, t_2) = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{n-1} \alpha_{kl} \psi_{kl}(t_1, t_2),$$

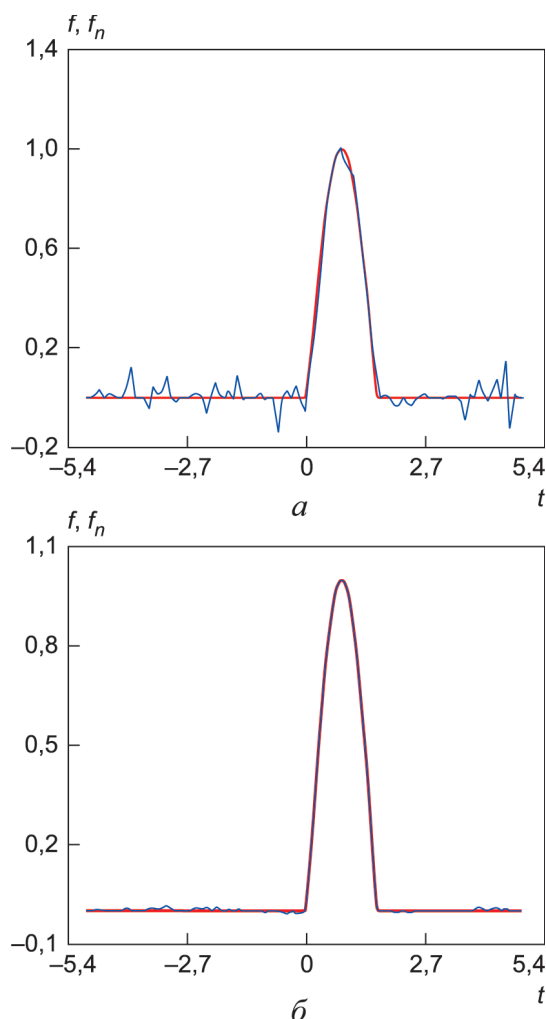


Рис. 1. Восстановление сигнала (14) при возмущении амплитуды его спектра случайной функцией с амплитудой $\varepsilon = 0,01$: а – первоначальный сигнал f (—); б – сигнал после фильтрации и осреднения по пяти значениям первоначально восстановленного сигнала f_n (—)

Fig. 1. Reconstruction of signal (14) when the amplitude of its spectrum is perturbed by a random function with the amplitude $\varepsilon = 0,01$: а – initial signal f (—); б – the signal is recovered after filtering and averaging over five values of the originally recovered signal f_n (—)

где

$$\psi_{kl}(t_1, t_2) = \begin{cases} 1, & (t_1, t_2) \in \Delta_{kl}; \\ 0, & (t_1, t_2) \in [0, a]^2 \setminus \Delta_{kl}, \end{cases}$$

$$k, l = \overline{0, n-1};$$

$$\Delta_{kl} = \{(t_1, t_2): t_1 \in [x_k, x_{k+1}), t_2 \in [x_l, x_{l+1})\}, k, l = \overline{0, n-2};$$

$$\Delta_{k, n-1} = \{(t_1, t_2): t_1 \in [x_k, x_{k+1}), t_2 \in [x_{n-1}, x_n]\}, k = \overline{0, n-2};$$

$$\Delta_{n-1, l} = \{(t_1, t_2): t_1 \in [x_{n-1}, x_n], t_2 \in [x_l, x_{l+1})\}, l = \overline{0, n-2};$$

$$\Delta_{n-1, n-1} = [x_{n-1}, x_n; x_{n-1}, x_n];$$

$$x_k = ak/n, k = \overline{0, n}.$$

Коэффициенты $\{\alpha_{kl}\}$, $k, l = \overline{0, n-1}$, определим из системы уравнений, записанной в операторном виде:

$$\left| \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{n-1} \alpha_{kl} \iint_{\Delta_{kl}} \exp[i(v_{k_1} t_1 + v_{k_2} t_2)] dt_1 dt_2 \right| = A(v_{k_1}, v_{k_2}), k_1, k_2 = \overline{0, n-1}, \quad (13)$$

где $v_k = -D_1 + k2D_1/n$, $k = \overline{0, n}$; D_1 – достаточно большое положительное число, определяемое из тех же соображений, что и константа D в одномерном случае.

Интегралы $\iint_{\Delta_{kl}} \exp[i(v_{k_1} t_1 + v_{k_2} t_2)] dt_1 dt_2$ вычисляются аналитически или, что менее точно, по квадратурным формулам

Таблица 1

Погрешности восстановления функции (14) при возмущении амплитуды спектра

ε	$\varepsilon_{\max}$	$\varepsilon_{\text{ср}}$	$\varepsilon_{\text{кв}}$	$\varepsilon_{\text{скв}}$
0,001	0,052	0,021	0,253	$2,553 \cdot 10^{-3}$
0,010	0,149	0,023	0,398	$4,016 \cdot 10^{-3}$
0,100	0,194	0,056	0,723	$7,301 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2

Крутизна фронта точной и восстановленной функции (14) при возмущении амплитуды спектра

l	$\varepsilon_{\text{кр.т}}$	$\varepsilon_{\text{кр.п}}$		
		0,001	0,01	0,1
0–10	0	0,023	0,208	0,764
11–20	0	0,017	0,428	0,823
21–30	0	0,012	0,279	1,103
31–40	0	0,044	0,298	0,521
41–49	0	0,043	0,528	0,480
50	1,010	1,240	1,548	1,660
51	1,970	1,960	1,156	0,010
52	1,860	1,850	1,676	4,780
53	1,660	1,640	2,254	0,450
54	1,390	1,390	1,798	2,340
55	1,070	1,070	1,073	1,820
56	0,710	0,710	0,708	0,720
57	0,310	0,320	0,315	0,430
58	0,090	0,090	0,515	0,340
59	0,490	0,490	0,371	0,240
60	0,880	0,860	0,176	0,130
61	1,220	1,210	1,623	1,470
62	1,520	1,510	1,799	2,700
63	1,750	1,740	1,477	1,040
64	1,920	1,900	1,919	0,600
65	2,010	1,990	1,109	1,440
66–70	0	0,032	0,314	0,558
71–80	0	0,016	0,119	0,308
81–90	0	0,004	0,363	0,721
91–99	0	0,016	0,807	0,982

прямоугольников. В этом случае (13) имеет более компактный вид, но формула будет менее точной. По аналогии с одномерным сигналом к системе (13) применяется непрерывный метод решения нелинейных операторных уравнений.

Модельные примеры.

Пример 1. Рассмотрим восстановление одномерного сигнала, заданного функцией

$$f(t) = \begin{cases} \sin 2t, & t \in [0, \pi/2] \\ 0, & t \in [-\infty, \infty] \setminus [0, \pi/2] \end{cases}. \quad (14)$$

Требуется по амплитуде спектра функции $f(t)$ восстановить сигнал и фазу его спектра.

Для демонстрации устойчивости предложенного в настоящей работе метода восстановления сигналов на амплитуду спектра сигнала налагалось возмущение, задаваемое датчиком случайных чисел:

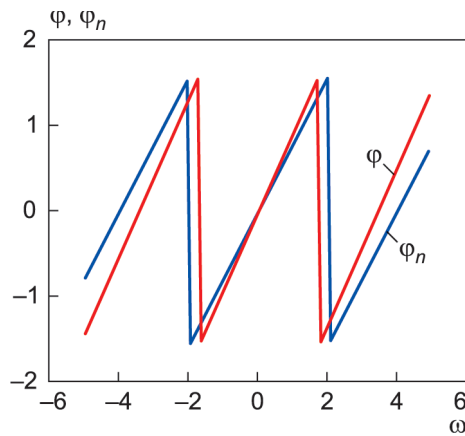


Рис. 2. Восстановление фазы спектра функции (14): ϕ (—) – первоначальная фаза; ϕ_n (—) – восстановленная фаза
Fig. 2. Recovery of the phase of the spectrum of the function (14): ϕ (—) – initial phase; ϕ_n (—) – recovered phase

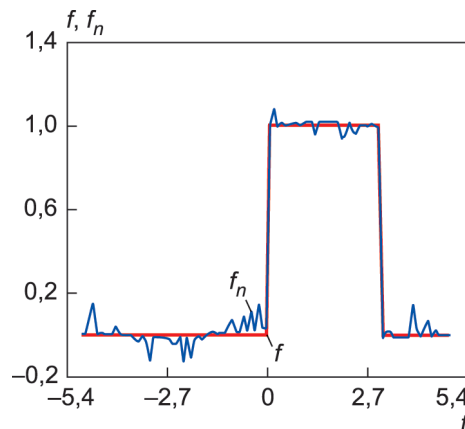


Рис. 3. Восстановление сигнала (15) (после фильтрации и осреднения по пяти точкам первоначально восстановленного сигнала) при возмущении амплитуды его спектра случайной функцией с амплитудой $\varepsilon = 0.01$: f (—) – первоначальный сигнал; f_n (—) – восстановленный сигнал

Fig. 3. Recovery of the signal (15) when the amplitude of its spectrum is perturbed by a random function with amplitude $\varepsilon = 0.01$. The signal is recovered after filtering and averaging the originally recovered signal over five points: f (—) – initial signal; f_n (—) – recovered signal

$$A_k(\omega_l) = A(\omega_l) + \xi_l(k), \quad l = \overline{0, N}, \quad k = 1, 2, 3;$$

$$\max_{0 \leq l \leq N} |\xi_l(1)| = 0.001; \quad \max_{0 \leq l \leq N} |\xi_l(2)| = 0.01; \quad \max_{0 \leq l \leq N} |\xi_l(3)| = 0.1.$$

Таблица 3

Погрешности восстановления функции (15) при возмущении амплитуды спектра

ε	$\varepsilon_{\max}$	$\varepsilon_{\text{ср}}$	$\varepsilon_{\text{кв}}$	$\varepsilon_{\text{СКВ}}$
0,001	0,043	0,001	0,148	$1,497 \cdot 10^{-3}$
0,010	0,152	0,026	0,43	$4,342 \cdot 10^{-3}$
0,100	0,194	0,056	0,723	$7,301 \cdot 10^{-3}$

Таблица 4

Крутизна фронта точной и восстановленной функции (15) при возмущении амплитуды спектра

l	$\varepsilon_{\text{кр.т}}$	$\varepsilon_{\text{кр.п}}$		
		0,001	0,01	0,1
0–10	0	0,006	0,371	1,114
11–20	0	0,021	0,29	0,476
21–30	0	0,013	0,487	1,098
31–40	0	0,039	0,138	0,505
41–49	0	0,026	0,697	0,854
50	10	9,740	9,585	9,474
51	0	0,015	0,872	0,991
52	0	0,017	0,824	1,175
53	0	0,016	0,168	0,514
54	0	0,015	0,115	0,120
55	0	0,013	0,027	0,136
56	0	0,009	0,025	0,133
57	0	0,005	0,024	0,189
58	0	0,000	0,102	0,106
59	0	0,005	0,143	0,172
60	0	0,010	0,016	0,607
61	0	0,013	0,013	0,117
62	0	0,016	0,579	1,067
63	0	0,018	0,593	0,706
64	0	0,018	0,001	1,466
65	0	0,017	0,002	0,730
66	0	0,014	0,006	1,216
67	0	0,011	0,010	0,270
68	0	0,006	0,013	0,471
69	0	0,000	0,759	1,143
70	0	0,006	0,097	0,096
71	0	0,023	0,609	1,120
72	0	0,025	0,409	0,921
73	0	0,021	0,064	0,068
74	0	0,018	0,410	0,439
75	0	0,015	0,021	0,062
76	0	0,012	0,020	0,178
77	0	0,010	0,085	0,260
78	0	0,008	0,120	1,127
79	0	0,006	0,015	0,594
80–90	0,909	0,913	1,238	1,771
91–99	0	0,080	0,215	0,392

Для решения примера 1 была использована вычислительная схема (8)–(9), в которой узлы определялись формулами $t_k = ak/N$, $k = \overline{0, N}$; $\overline{t_k} = (t_k + t_{k+1})/2$, $k = \overline{0, N-1}$; $\omega_k = -D + 2Dk/N$, $k = \overline{0, N}$; $\overline{\omega_k} = (\omega_k + \omega_{k+1})/2$, $k = \overline{0, N-1}$.

На рис. 1, а представлены результаты восстановления функции (14), где $f(t)$, $f_n(t)$ – точный и восстановленный сигналы соответственно, при $D=5$ числе узлов в вычислительной схеме $N=99$; шаге $h=0,001$, числе итераций $m=1000$ и возмущении $A_2(\omega_l) = A(\omega_l) + \xi_l(2)$, $l = \overline{0, N}$; $\max_{0 \leq l \leq N} |\xi_l(2)| = 0,01$.

Так как функция $A(\omega)$ неотрицательная, то при вычислении функции $A_k(\omega)$ в узлах ω_l , $l = \overline{0, N}$, проводится фильтрация:

$$A_k(\omega_l) = \begin{cases} A(\omega_l) + \xi_l(k), & A(\omega_l) + \xi_l(k) > 0; \\ 0, & A(\omega_l) + \xi_l(k) \leq 0. \end{cases}$$

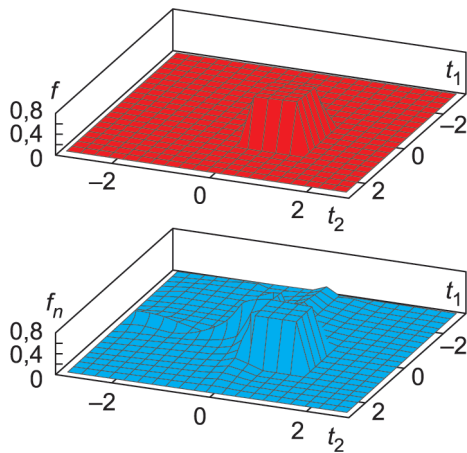


Рис. 4. Восстановление функции (16) при возмущении амплитуды спектра исходного сигнала случайной функцией с амплитудой $\varepsilon = 0,01$

Fig. 4. Recovery of the function (16) when the amplitude of the spectrum of the original signal is disturbance by a random function with amplitude $\varepsilon = 0.01$

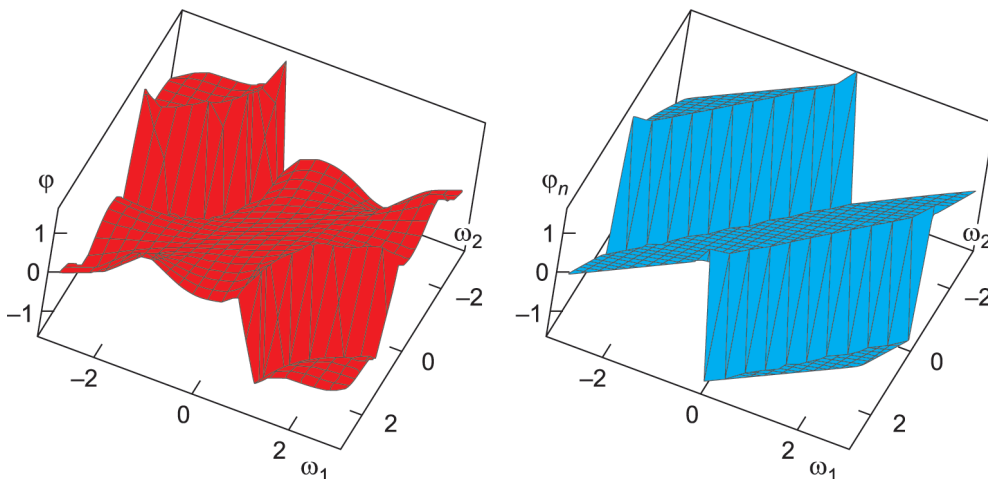


Рис. 5. Восстановление фазы спектра сигнала функции (16)

Fig. 5. Recovery of the phase of the spectrum of the function given by formula (16)

Результаты восстановления сигнала после фильтрации и осреднения по пяти значениям первоначально восстановленного сигнала, показаны на рис. 1, б. В табл. 1, 2 представлены результаты восстановления (при указанных выше D, N, h, m) функции (14) при возмущении модуля её спектра случайной функцией с амплитудой ε : максимальная $\varepsilon_{\max}$, средняя $\varepsilon_{\text{ср}}$, квадратичная $\varepsilon_{\text{кв}}$ и среднеквадратичная $\varepsilon_{\text{СКВ}}$ погрешности, а также крутизна фронтов точной $\varepsilon_{\text{кр.т}}$ и приближённой $\varepsilon_{\text{кр.п}}$ функций.

Под крутизной фронта функции понимается первая конечная разность соответствующей функции (в табл. 2 внесены конечные разности колебательных процессов, обусловленных эффектом Гиббса).

На рис. 2 приведены точное $\varphi(\omega)$ и восстановленное $\varphi_n(\omega)$ значения фазы.

Пример 2. Рассмотрим восстановление одномерного сигнала, заданного функцией

$$f(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, 3] \\ 0, & t \in [-\infty, \infty] \setminus [0, 3] \end{cases}. \quad (15)$$

Требуется по амплитуде спектра функции $f(t)$ восстановить сигнал и фазу её спектра.

На рис. 3 изображены исходная и восстановленная после фильтрации и осреднении по пяти точкам функции (15). На амплитуду спектра исходной функции наложено возмущение с амплитудой $\varepsilon = 0,01$. В табл. 3, 4 представлены числовые характеристики результатов восстановления при тех же D, N, h, m, ε , что в табл. 1, 2.

Пример 3. Рассмотрим восстановление двумерного сигнала, заданного функцией

$$f(t_1, t_2) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t_1, t_2 \leq 1 \\ 0, & (-\infty \leq t_1, t_2 \leq \infty) \setminus (0 \leq t_1, t_2 \leq 1) \end{cases}. \quad (16)$$

Используем вычислительную схему (13) при следующих значениях параметров: $D_1=3$, числе узлов коллокации $n=50$, шаге $h=0,001$, и числе итераций $m=500$ метода Эйлера.

На рис. 4, 5 соответственно представлены исходный $f(t_1, t_2)$ и восстановленный $f_n(t_1, t_2)$ сигналы (16) и определённые по известному модулю спектра фазы $\varphi(u_1, u_2)$, $\varphi_n(\omega_1, \omega_2)$ этих сигналов при возмущении амплитуды спектра исходного сигнала случайной функцией с амплитудой $\varepsilon = 0,01$. В табл. 5 приведены погрешности восстановления сигнала до и после осреднения, в табл. 6 – крутизна фронтов точного и восстановленного сигналов, где ПФ, ЦФ, ЗФ – передний, центральный и задний фронты соответственно.

Таблица 5

Погрешности восстановления сигнала (16) до и после осреднения

Фронт сигнала	$\varepsilon_{\max}$	$\varepsilon_{\text{ср}}$	$\varepsilon_{\text{кв}}$	$\varepsilon_{\text{скв}}$
Погрешности до осреднения				
Передний	0,400	0,032	0,570	0,012
Центральный	0,068	$7,241 \cdot 10^{-3}$	0,117	$2,381 \cdot 10^{-3}$
Задний	0,048	$6,841 \cdot 10^{-3}$	0,093	$1,893 \cdot 10^{-3}$
Погрешности после осреднения				
Передний	0,156	0,019	0,236	$5,018 \cdot 10^{-3}$
Центральный	0,028	$6,011 \cdot 10^{-3}$	0,061	$1,307 \cdot 10^{-3}$
Задний	0,033	$6,540 \cdot 10^{-3}$	0,070	$1,499 \cdot 10^{-3}$

Таблица 6

Крутизна фронтов точного и восстановленного сигналов (16)

l	$\varepsilon_{\text{кр.т}}$	$\varepsilon_{\text{кр.п}}$		
		ПФ	ЦФ	ЗФ
0–7	0	0,110	0,182	0,075
7–15	0	0,343	0,087	0,142
16–22	0	0,275	0,111	0,083
23	0	1,059	0,195	0,216
24	0	1,622	0,475	0,357
25	10	11,310	9,320	9,990
26	0	1,700	0,001	0,001
27	0	2,300	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0
31	0	0	0	0,001
32	0	0	0,001	0,001
33–40	1,25	1,301	1,301	1,264
41–49	0	0,011	0,021	0,018

Модельные примеры иллюстрируют эффективность предложенного двухступенчатого метода восстановления сигнала и фазы спектра и численных алгоритмов, реализующих метод.

Заключение. Предложенный в работе метод позволяет восстанавливать фазу сигнала по амплитуде спектра без привлечения дополнительной информации о сигнале. Метод основан на предварительном восстановлении сигнала по амплитуде спектра, что представляет самостоятельный интерес. Приведённые примеры показывают эффективность предложенного метода. Метод можно использовать при решении многих обратных задач информационно-измерительной техники, когда возможны измерения только операторов (функционалов) от подлежащих определению сигналов.

Список источников

1. Boikov I., Zelina Y., Vasyunin D., *Proceedings Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies*,

MWENT 2020, Moscow, 11–13 March 2020, IEEE, 2020, pp. 1–5, 9067415.

<https://doi.org/10.1109/MWENT47943.2020.9067415>

2. Бойков И. В., Зелина Я. В. Приближённые методы решения амплитудно-фазовой проблемы для непрерывных сигналов // *Измерительная техника*. 2021. № 5. С. 37–46. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-5-37-46>

3. Boikov I. V., Zelina Ya. V., Vasyunin D. I., *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 2099, 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2099/1/012002>

4. Wolf E., *Physics Letters A*, 2010, vol. 374, no. 3, pp. 491–495. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2009.10.074>

5. Wolf E., *Advances in Imaging and Electron Physics*, 2011, vol. 165, pp. 283–325. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385861-0.00007-5>

6. Потапов А. А., Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Пахомов А. А., Герман В. А. Новейшие методы обработки изображений. М.: Физматлит, 2008. 496 с.

7. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука. 1974. 224 с.

8. Бойков И. В. Об одном непрерывном методе решения нелинейных операторных уравнений // *Дифференциальные уравнения*. 2012. Т. 48. № 9. С. 1308–1314.

9. Далецкий Ю. Л., Крейн М. Г. Устойчивость решений дифференциальных уравнений в банаховом пространстве. М.: Наука, 1970. 534 с.

10. Деккер К., Вервер Я. Устойчивость методов Рунге-Кутты для жёстких нелинейных дифференциальных уравнений: пер. с англ. А. Ю. Захарова и др. / Под ред. А. А. Самарского. М.: Мир, 1988. 332 с.

11. Канторович Л. В., Акилов Г. П. Функциональный анализ. М.: Наука. 1984. 752 с.

12. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. М.: Бинум. Лаборатория знаний. 2011. 640 с.

References

1. Boikov I., Zelina Y., Vasyunin D., *2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Proceedings of the International Conference*, Moscow, Russia, 2020, March 11–13, IEEE, 2020, pp. 1–5, 9067415.

<https://doi.org/10.1109/MWENT47943.2020.9067415>

2. Boikov I. V., Zelina Ya. V., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no.5, pp. 386–397. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01944-y>

3. Boikov I. V., Zelina Ya. V., Vasyunin D. I., *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 2099, 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2099/1/012002>

4. Wolf E., *Physics Letters A*, 2010, vol. 374, no. 3, pp. 491–495. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2009.10.074>

5. Wolf E., *Advances in Imaging and Electron Physics*, 2011, vol. 165, pp. 283–325. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385861-0.00007-5>

6. Potapov A. A., Gulyaev Yu. V., Nikitov S. A., Pakhomov A. A., German V. A., *Noveishie metody obrabotki izobrazhenii [Latest Image Processing Techniques]*, Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 496 p. (In Russ.)

7. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ja., *Metodi reseniy nekorrektnykh zadach*, Moscow, Nauka Publ., 1974, 224 p. (In Russ.)
8. Boikov I. V., *Differential Equations*, 2012, vol. 48, iss. 9, pp. 1288–1295. <https://doi.org/10.1134/S001226611209008X>
9. Daletskii Yu. L., Krein M. G., Stability of Solutions of Differential Equations in Banach Space, *Translations of Mathematical Monographs*, Reprinted edition, 1974, vol. 43. <https://doi.org/10.1090/mmono/043>
10. Dekker K., Verwer J. G., *Stability of Runge-Kutta Methods for Stiff Nonlinear Differential Equations*, CWI Monographs 2, North-Holland, Amsterdam, 1984.
11. Kantorovich L. V., Akilov G. P., *Funktsional'nyi analiz*, Moscow, Nauka Publ., 1984. 752 p. (In Russ.)
12. Bakhvalov N. S., Zhidkov N. P., Kobel'kov G. M., *Chislennye metody*, Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy Publ., 2011, 640 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 22.04.2022; одобрена после рецензирования 03.08.2022; принята к публикации 04.08.2022.
The article was submitted 22.04.2022; approved after reviewing 03.08.2022; accepted for publication 04.08.2022.

Экспериментальное определение акустического центра измерительного гидрофона

Буллат Ильгизович Хатамтаев¹, Николай Геннадьевич Щерблюк²✉

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

¹bulat_3004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8197-8160>

²shcherbluck@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7547-9202>

Аннотация. Рассмотрены методы повышения точности фазовой калибровки гидрофонов. Показано, что при калибровке гидрофона опорный центр, например геометрический центр контура активного элемента гидрофона, может быть смещён относительно акустического центра активного элемента из-за неравномерной толщины гидроизоляционного покрытия элемента. Предложен метод определения положения акустического центра гидрофона относительно выбранного опорного центра. Описана схема эксперимента по определению положения (смещения) акустического центра гидрофона относительно геометрического центра контура активного элемента. Приведены результаты экспериментов для гидрофонов разных типов и проанализированы источники неопределённости измерений. Показано, что учёт смещения акустического центра позволяет повысить точность фазовой калибровки гидрофонов. Предложенный метод можно использовать в области гидроакустических измерений чувствительности приёмников звукового давления.

Ключевые слова: акустический центр, гидрофон, фазовая калибровка гидрофона, опорный центр, геометрический центр, контур активного элемента, смещение

Для цитирования: Хатамтаев Б. И., Щерблюк Н. Г. Экспериментальное определение акустического центра измерительного гидрофона // Измерительная техника. 2022. № 10. С. 53–57. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-53-57>

Experimental determination of the acoustic center of a measuring hydrophone

Bulat I. Khatamtaev¹, Nikolay G. Shcherblyuk²✉

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

¹bulat_3004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8197-8160>

²shcherbluck@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7547-9202>

Abstract. The following problem is considered in the underwater acoustic. At the same time the location of the hydrophone acoustic center must be known respect to the reference point. A method is proposed for determining the position of the acoustic center of a hydrophone relative to a selected reference center. The scheme of the experiment to determine the position (displacement) of the acoustic center of a hydrophone relative to the geometric center of the active element contour is described. The results of the experiment for different types of hydrophones are presented and the sources of measurement uncertainties are discussed. It is shown that taking into account the displacement of the acoustic center makes it possible to improve the accuracy of the phase calibration of hydrophones. The proposed method can be used in the field of the underwater measurement of the sound pressure receiver sensitivity.

Keywords: acoustic center, hydrophone, hydrophone phase calibration, reference center, geometric center, active element outline, offset

Введение. Устройства для преобразования акустических колебаний в электрические и электрических колебаний в акустические широко применяются в деятельности, связанной с освоением водной среды планеты. На основе данных устройств созданы приёмники звукового давления (гидрофоны) и колебательной скорости, излучатели акустических волн разной направленности, принимающие и излучающие гидроакустические антенны, эхолоты

и пр. Если преобразователь, например гидрофон, используется как средство измерений, то его необходимо калибровать [1] – определять частотную зависимость чувствительности в режиме приёма. Чувствительность гидрофона связывает звуковое давление волны, падающей на преобразователь, и напряжение на выходе. Эта величина комплексная, поэтому выделяют амплитудную и фазовую калибровки.

Любой метод калибровки гидрофона реализуется с использованием калибруемого приёмника и излучающего преобразователя. При этом необходимо иметь информацию о создаваемом излучателем акустическом поле в заданной точке пространства, в частности в месте расположения приёмника. Расчёт акустического поля, создаваемого излучателем произвольной формы и размеров, – непростая задача. Если габаритные размеры измерительного бассейна позволяют рассматривать создаваемое излучателем звуковое поле в дальней зоне, то излучатель можно заменить эквивалентной излучающей точкой. Физической моделью излучающей точки является пульсирующая сфера с малым по сравнению с длиной излучаемой волны радиусом, звуковое давление волны обратно пропорционально расстоянию до центра сферы [2]. Точку в пространстве, из которой исходят сферические гармонические волны, называют акустическим центром излучателя (ГОСТ Р МЭК 61094-3-2001¹). Положение акустического центра зависит от значения длины волны, дистанции между излучателем и точкой наблюдения, а также выбранного направления излучения.

На результаты измерений чувствительности гидрофона оказывает влияние приёмник излучения, поскольку падающая акустическая волна рассеивается на корпусе приёмника. Поэтому при выполнении калибровки используют понятие чувствительности по полю – считают, что гидрофоном измеряют звуковое давление в точке невозмущённого звукового поля (свободного поля), а вносимые гидрофоном искажения рассматривают как погрешность измерения. В этом случае гидрофон заменяют эквивалентным точечным приёмником, расположенным в акустическом центре гидрофона. Однако понятие акустического центра гидрофона в режиме приёма не столь очевидно, как для излучения. Принято считать, что акустические центры обратимого преобразователя в режиме приёма и в режиме излучения совпадают, существуют и другие определения понятия акустического центра [3, 4].

Расстояния между акустическими центрами преобразователей входят в расчётную формулу комплексной чувствительности гидрофона [5]. Точность определения расстояний влияет на точность калибровки измерительного гидрофона и особенно критична при измерениях фазового угла чувствительности (фазовой калибровке). Однако до настоящего времени способ экспериментального определения положения акустического центра гидрофона не стандартизирован, а определение положения этого центра – одна из экспериментальных задач, решаемых лабораторной гидроакустикой.

Ситуацию с определением положения акустического центра гидрофона усугубляет то, что способ, основанный на измерении зависимости звукового давления от расстояния между излучателем и приёмником, получивший распространение при калибровке микрофонов [6, 7], оказался малоприменимым в гидроакустике [8]. В воздушной акустике

применяются другие методы определения акустического центра неточечного источника звука, например, используют большое число приёмников звука, объединённых в одну систему, и последующую обработку полученных данных [9, 10]. Последняя версия стандарта IEC 60565-1-2020² рекомендует калибровать гидрофон относительно назначенного опорного центра, например геометрического центра активного элемента гидрофона. Исследованию экспериментальной зависимости звукового давления от дистанции отводится роль проверки условий свободного поля. Однако активный элемент гидрофона скрыт непрозрачным гидроизоляционным покрытием, которое не везде имеет одинаковую толщину, из-за чего геометрический центр гидрофона, определяемый по контуру покрытия, может быть смещён относительно центра активного элемента [11].

Цель данной работы – предложить и экспериментально обосновать способ определения положения акустического центра гидрофона. При рассуждениях ограничимся рассмотрением гидрофонов со сферическим и цилиндрическим активными элементами, наиболее распространённых в практике гидроакустических измерений.

Экспериментальное определение положения акустического центра. Если активный элемент гидрофона – идеальная сфера или цилиндр, то акустический центр является центром сферы или окружности поперечного сечения цилиндра, проведённого через центр осевой линии. Рассмотрим ситуацию, при которой на активный элемент гидрофона, расположенного в однородной и безграничной водной среде, со скоростью c падает акустическая волна от излучателя в точке A (рис. 1). Активный элемент представим геометрической моделью в виде сферы (CB , C) радиусом $b=CB$ с центром в точке C и покрывающего его компанунда – сферы (DE , D) радиусом DE с центром в точке D . Точку D – геометрический центр активного элемента – примем в качестве опорной точки, относительно которой будем определять положение акустического центра, т. е. центр сферы (CB , C), смещённый относительно геометрического центра на отрезок DC . Для простоты примем, что точки C и D лежат в одной плоскости, перпендикулярной оси симметрии гидрофона.

Используя теорему косинусов для треугольника ADC и допущение, что излучатель расположен достаточно далеко по сравнению со смещением $\Delta=DC$, получим приближённое выражение для расстояния $r(\alpha)=AB$ между излучателем и ближайшей к нему точкой сферы (CB , C):

$$r(\alpha)=L-b+\Delta\cos(\alpha+\alpha_0), \quad (1)$$

где $L=AD$ – расстояние от излучателя до геометрического центра гидрофона; $\alpha=\angle ADF$ – угол между опорным направлением гидрофона и направлением на излучатель; $\alpha_0=\angle FDE$ – угол между опорным направлением гидрофона

¹ ГОСТ Р МЭК 61094-3-2001. ГСИ. Микрофоны измерительные. Первичный метод градуировки по свободному полю лабораторных эталонных микрофонов методом взаимности.

² IEC 60565-1-2020. Подводная акустика. Гидрофоны. Калибровка гидрофонов. Часть 1. Процедуры калибровки гидрофонов в свободном поле.

и направлением смещения DC ; формула (1) верна и для гидрофона с цилиндрическим активным элементом.

Обозначим $t(\alpha)$ – временной интервал от момента начала излучения до момента начала приёма сигнала гидрофоном, за который фронт акустической волны проходит расстояние $r(\alpha) = ct(\alpha)$. Измерив зависимость временного интервала $t(\alpha)$ от угла α , получим выражение (1), по которому можно определить смещение Δ и угол α_0 .

Постановка эксперимента. Схема эксперимента по измерению зависимости $t(\alpha)$ показана на рис. 2. Измерения проводили в гидроакустическом бассейне размером $1,5 \times 1 \times 1$ м с оптически прозрачными стенками. Излучатель $И$ размещали в бассейне на средней глубине равноудаленно от стенок бассейна и закрепляли неподвижно. Измерительный гидрофон $ИГ$ устанавливали на штанге координатно-поворотного устройства на расстоянии 80 см от излучателя так, чтобы геометрические центры гидрофона и излучателя находились на одной глубине, и ориентировали опорным направлением на излучатель. Координатно-поворотное устройство позволяет смещать гидрофон как в плоскости XY , параллельной поверхности воды, так и по глубине, а также поворачивать относительно вертикальной оси, совпадающей с осью симметрии гидрофона.

Излучатель возбуждали с помощью генератора $Г$, на выходе которого формировали квадратурно дополненные (косинусные и синусные) тональные импульсы заданной частоты и амплитуды [12]. Длительность импульсов устанавливали такой, чтобы обеспечить возможность временной селекции прямого сигнала излучателя в сигнале на выходе гидрофона. Аппаратура приёмного тракта $АПТ$ включала усилитель сигнала по напряжению и цифровой осциллограф. Для увеличения отношения сигнал/шум применяли когерентное накопление сигналов, принятых гидрофоном. Оцифрованные осциллограммы сигналов сохраняли в памяти персонального компьютера $ПК$. После сохранения текущей осциллограммы гидрофон поворачивали на угловой шаг $\Delta\alpha = 360^\circ/N$ для снятия следующей осциллограммы. Эту процедуру повторяли до совершения гидрофоном полного оборота вокруг своей оси.

Формула (1) выведена в предположении, что точка D во время поворотов гидрофона не смещается относительно геометрического центра закреплённого неподвижно излучателя, т. е. лежит на оси вращения. Из-за прецессии штанги координатно-поворотного устройства достичь такой неподвижности с приемлемой точностью – сложная инженерная задача. Однако, если позицию точки D при приёме сигнала излучателя с опорного направления гидрофона ($\alpha=0$) зафиксировать, то после каждого поворота на угол $\Delta\alpha$ координаты точки можно корректировать с помощью координатно-поворотного устройства, возвращая геометрический центр гидрофона в позицию, зафиксированную в опорном направлении.

Первоначальную позицию геометрического центра гидрофона в эксперименте фиксировали следующим образом. Координату геометрического центра по оси Y контролировали с помощью лазера $Л$, создающего луч,

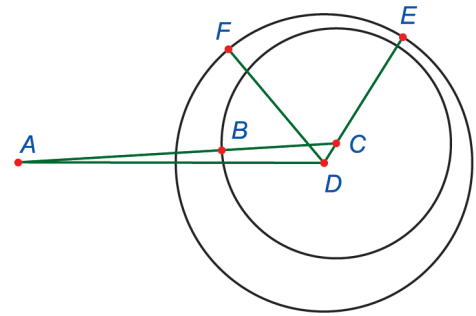


Рис. 1. Геометрическая модель гидрофона; вид сверху вдоль оси симметрии гидрофона

Fig. 1. A hydrophone geometrical model, the view from above, along to hydrophone symmetry axis

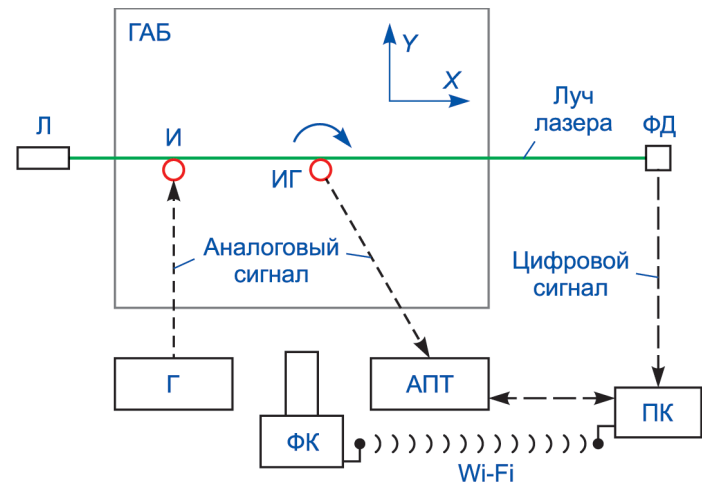


Рис. 2. Принципиальная схема эксперимента (вид сверху): $Л$ – лазер; $И$ – излучатель; $ИГ$ – измерительный гидрофон; $ФД$ – фотодетектор; $Г$ – генератор; $ФК$ – фотокамера; $АПТ$ – аппаратура приёмного тракта; $ПК$ – персональный компьютер; $ГАБ$ – гидроакустический бассейн

Fig. 2. Schematic of the experiment (view from above): L – laser; E – emitter; H – hydrophone; LS – light sensor; G – generator; C – camera; ERP – equipment of the receiving path; PC – personal computer; UT – underwater tank

параллельный прямой $И - ИГ$ и касающийся края активного элемента гидрофона $ИГ$ (см. рис. 2). Луч лазера направляли в фотодетектор $ФД$, с помощью которого регистрировали мощность лазерного излучения. Зафиксировав значение мощности при $\alpha=0$, после очередного поворота гидрофона корректировали положение геометрического центра гидрофона так, чтобы показание фотодетектора совпадало с зафиксированным значением.

Положение геометрического центра гидрофона по глубине и координате по оси X контролировали фотокамерой $ФК$. Полученное с помощью фотокамеры изображение активного элемента гидрофона передавали по Wi-Fi в персональный компьютер $ПК$. По фотографии гидрофона, полученной при угле $\alpha=0$, строили мишень – контурное изображение активного элемента с меткой в точке геометрического центра

изображения. После очередного поворота гидрофона его положение юстировали так, чтобы геометрический центр контурного изображения активного элемента при текущем угле поворота совпал с геометрическим центром мишени.

Квадратурной обработкой полученных осциллограмм получали временные зависимости огибающих модуля и аргумента принятых гидрофоном сигналов. По положению передних фронтов огибающих относительно момента излучения строили зависимость $\Delta t(\alpha)$ изменения временной задержки принятого гидрофоном сигнала от угла поворота гидрофона α . В качестве опорного значения использовали задержку сигнала t_0 , принятого гидрофоном в опорном направлении. Полученную зависимость $\Delta t(\alpha)$ использовали для нахождения $t(\alpha) = \Delta t(\alpha) + t_0$.

Результаты эксперимента. Зависимость $t(\alpha)$ аппроксимировали функцией

$$X_0 + X_1 \cos \alpha + X_2 \sin \alpha, \quad (2)$$

где X_0, X_1, X_2 – неизвестные параметры, значения которых определяли методом наименьших квадратов.

Из (1), (2) следует, что смещение $\Delta = c\sqrt{X_1^2 + X_2^2}$. Значение угла α_0 получали по положению локального минимума функции (2), который достигается в точке $\alpha_{\min} = -\arctan(X_2/X_1)$. Угол находили по формуле $\alpha_0 = \pi - \alpha_{\min}$. Вычисленные таким образом параметры Δ, α_0 определяют положение акустического центра гидрофона относительно геометрического центра в полярных координатах.

На рис. 3 представлены зависимость смещений акустического центра $\Delta r(\alpha) = c(t(\alpha) - t_0)$, построенная по данным эксперимента с гидрофоном ГИ 20 (ВНИИФТРИ, Россия), и функция, аппроксимирующая эту зависимость по формуле (2) (скорость звука в гидроакустическом бассейне принимали

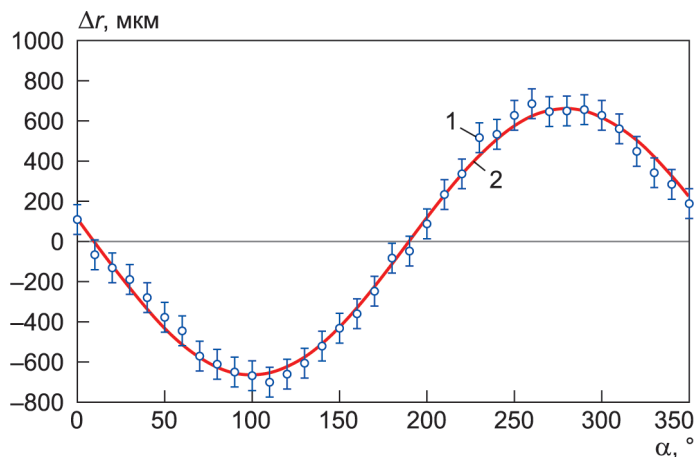


Рис. 3. Зависимость смещения Δr от углов α поворота риски для гидрофона типа ГИ 20:

1 – экспериментальные данные (с разбросом); 2 – аппроксимация по формуле (2)

Fig. 3. Relation between offset values Δr and rotation angles α of the hydrophone reference direction for hydrophone GI 20:

1 – experimental data (with a spread); 2 – approximation by the formula (2)

равной 1478 м/с). Аналогичные эксперименты были выполнены для ряда гидрофонов, различающихся по размерам активного элемента, типу и толщине покрытий: ОП-1, ГИ 21, ГИ-20 (ВНИИФТРИ, Россия) и ТС4034 (Reson, Дания). В таблице приведены смещение Δ и углы α_0 , стандартная суммарная неопределённость u_c результатов измерений смещения и углов для этих гидрофонов (d, d^* – диаметры активного элемента без учёта и с учётом толщины покрытия соответственно).

Источники неопределённости измерений. К доминирующим источникам неопределённости измерения координат акустического центра относятся следующие неопределённости: определения зависимости $t(\alpha)$; фиксации геометрического центра гидрофона в направлении осей X, Y ; положения оси вращения гидрофона, а также неопределённость, обусловленная влиянием вибрации.

Применение в приёмном тракте маломощного усилителя по напряжению в сочетании с когерентным накоплением принятых гидрофоном сигналов цифровым осциллографом позволило значительно увеличить отношение сигнал/шум осциллограмм, которые далее обрабатывали. Для повышения точности определяли не временную задержку принятых гидрофоном импульсов излучателя, а зависимость изменения этой задержки от угла падения звуковой волны. Для этого использовали характерный участок в начальной части переднего фронта огибающих. Частота дискретизации сигнала аналого-цифровым преобразователем осциллографа составляет не менее 500 МГц, что даёт оценку верхней границы неопределённости измерения изменения временной задержки не более 3 мкс.

Минимальный шаг 12 мкм перемещения координатно-поворотного устройства принимали в качестве оценки неопределённости положения оси вращения гидрофона.

Разрешение матрицы фотокамеры, удалённость фотокамеры от гидрофона и кратность увеличения объектива подбирали такими, что размер одного пикселя изображения в направлении оси X соответствовал 22 мкм. Положения контура гидрофона до и после его поворота выравняли с погрешностью 1 пиксел изображения.

В направлении оси Y опорную точку фиксировали с помощью лазерного луча и фотодетектора. На неопределённость фиксации влияют чувствительность фотодетектора и расстояние от излучателя до гидрофона. Установили, что эта неопределённость мала по сравнению с рассмотренными выше и ей можно пренебречь.

Смещение Δ , угол α_0 и неопределённости их измерений для гидрофонов различных типов

Тип гидрофона	d , мм	d^* , мм	Δ , мкм	u_c , мкм	α_0 , °
ГИ 20	20	23	664	71	99
ОП-1	40	44	252	45	299
ГИ-20	20	27	710	89	210
ГИ 21	10	13	452	52	285
ТС4034	6	11	288	38	137

Неопределённость фиксации геометрического центра гидрофона по оценке составила не более 22 мкм.

Следствие вибрации в помещении гидроакустического бассейна – случайный разброс результатов измерения смещения Δ . В экспериментах стандартная неопределённость типа А не превысила 15 % среднего значения результатов измерения. Неопределённость типа В результата измерения смещения акустического центра гидрофона относительно геометрического центра составила 25 мкм. Значения суммарной неопределённости результата измерения u_c приведены в таблице.

Обсуждение результатов. При калибровке гидрофона геометрический центр контура активного элемента гидрофона смещён относительно акустического центра активного элемента в среднем на 0,5 мм, что составляет примерно 20 % средней толщины покрытия, и при современных технических возможностях это смещение можно определить с неопределённостью 12–15 %.

При измерении модуля частотной характеристики чувствительности влияние несовпадения акустического и геометрического центров гидрофона пренебрежимо мало на фоне других источников погрешности, и при калибровке по амплитуде используют геометрический центр активного элемента гидрофона. При измерениях аргумента комплексной чувствительности согласно IEC 60565-1-2020 формула вычисления фазового угла чувствительности гидрофона методом взаимности основана на предположении, что геометрические центры всех преобразователей расположены на одной прямой, причём при разворотах калибруемого гидрофона его геометрический центр остается неподвижным. Если акустический центр калибруемого гидрофона не совпадает с его геометрическим центром, то возникает фазовый набег, который вносит дополнительную погрешность в фазовый угол чувствительности. Например, на частоте 100 кГц смещение 0,5 мм акустического центра относительно геометрического центра приведёт к неопределённости фазового угла 12°, что сравнимо с неопределённостью результатов измерений на первичном эталоне [13]. Проблема устраняется, если в результате измерения фазового угла чувствительности ввести поправку $\omega \Delta \cos \alpha_0 / c$, где ω – частота калибровки; c – скорость звука.

Отметим также, что форма активного элемента гидрофона отклоняется от идеальной сферы, в том числе по причине сборки активного элемента из нескольких частей, например из двух полусфер. Степень этого отклонения можно оценить по экспериментальной зависимости $t(\alpha)$, если добавить в аппроксимирующую функцию (2) слагаемые с косинусом и синусом угла $t\alpha$, где $m \geq 2$.

Заключение. Результаты данной работы показывают, что смещение акустического центра активного элемента гидрофона относительно контура его покрытия – характерное явление для используемых на практике гидрофонов. Смещение акустического центра относительно опорного центра вызывает фазовый набег, уменьшающий точность фазовой калибровки гидрофонов относительно опорного центра. Предложенный метод экспериментального определения этого смещения

позволяет рассчитать поправку к фазовой чувствительности гидрофона, что повышает точность её измерения.

Список источников / References

1. Справочник по гидроакустике. Изд. 2-е, перераб. и доп. / ред. А. Е. Колесникова. Л.: Судостроение, 1988. 522 с. [*Spravochnik po gidroakustike*, 2nd ed., ed. by A. E. Kolesnikov, Leningrad, Sudostroenie Publ., 1988, 522 p. (In Russ.)].
2. Свердлин Г. М. Прикладная гидроакустика. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1990. 320 с. [*Sverdlin G. M., Prikladnaya gidroakustika*, 2nd ed., Leningrad, Sudostroenie Publ., 1990, 320 p. (In Russ.)].
3. Trott W., Effective acoustic center redefined, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1977, vol. 62, no. 2, pp. 468–469. <https://doi.org/10.1121/1.381510>
4. Jacobsen F., Barrera-Figueroa S., and Rasmussen K., *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, vol. 115, no. 4, pp. 1468–1473. <https://doi.org/10.1121/1.1652036>
5. Боббер Р. Гидроакустические измерения: Пер с англ. М.: Мир, 1974. 359 с. [Robert J. Bobber, *Underwater electro-acoustical measurements*, Naval Research Laboratory, Washington D.C., 1970].
6. Barrera-Figueroa S., Rasmussen K., Jacobsen F., *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, vol. 120, no. 5, pp. 2668–2675. <https://doi.org/10.1121/1.2345830>
7. Rodrigues D., Durocher J.-N., Bruneau M., Bruneau A.-M., *Acta Acustica united with Acustica*, 2010, vol. 96, no. 2, pp. 300–305. <https://doi.org/10.3813/AAA.918279>
8. Исаев А. Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеев: ВНИИФТРИ, 2008. 369 с. [Isaev A. E., *Tochnaja graduirovka priemnikov zvukovogo davleniya v vodnoj srede v usloviyah svobodnogo polja*, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2008, 369 p. (In Russ.)].
9. Hagai I. B., Pollow M., Vorländer M., Rafaely B., *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, vol. 130, no. 4, pp. 2003–2015. <https://doi.org/10.1121/1.3624825>
10. Deboy D., Zotter F., Acoustic center and orientation analysis of sound-radiation recorded with a surrounding spherical microphone array, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ambisonics and Spherical Acoustics*, Paris, May 6–7, 2010, p. 21.
11. Hayman G., Wang Y., Robinson S. P., *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, vol. 133, no. 5, pp. 750–759. <https://doi.org/10.1121/1.4774272>
12. Исаев А. Е. Уменьшение влияния переходного процесса при градуировке гидрофонов по полю на низких частотах с использованием квадратурно-дополненных гармонических сигналов // Измерительная техника. 2010. № 4. С. 20–24. [Isaev A. E., *Measurement Techniques*, 2010, vol. 53, no. 4, pp. 379–385. <https://doi.org/10.1007/s11018-010-9514-x>].
13. Hayman G., Robinson S., *Proc. 11th Europ. Conf. on Underwater Acoustics*, Edinburgh, 2012, pp. 1437–1444. <https://doi.org/10.1121/1.4770061>

Статья поступила в редакцию 25.08.2022; одобрена после рецензирования 13.09.2022; принята к публикации 14.09.2022.
The article was submitted 25.08.2022; approved after reviewing 13.09.2022; accepted for publication 14.09.2022.

Научная статья

УДК 53.082.4; 004.934

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-58-63>

Совершенствование методики измерения показателя точности авторегрессионной модели речевого сигнала

Владимир Васильевич Савченко

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Н. Новгород, Россия, vsavchenko@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-3045-3337>

Аннотация. Рассмотрена задача определения точности авторегрессионной модели речевого сигнала и предложен метод измерений показателя точности в режиме скользящего окна наблюдений. В качестве показателя точности использовано модифицированное значение COSH-расстояния (hyperbolic cosine – функции гиперболического косинуса) авторегрессионной модели относительно одноимённой (однофонемной) периодограммы Шустера в роли опорного спектрального образца. Для изучения возможностей предложенного метода поставлен и проведён натурный эксперимент, в котором объектом исследования служил набор авторегрессионных моделей разных порядков. Указанные модели получены методом Берга для гласных звуков речи контрольного диктора. По результатам выполненных измерений для каждого гласного звука найдены оптимальные значения порядка авторегрессии и соответствующая ему оптимальная авторегрессионная модель. Показано, что данная оптимизация позволила повысить точность авторегрессионной модели речевого сигнала более чем на 60 % в зависимости от звука речи контрольного диктора и особенностей его голосового тракта. Полученные результаты предназначены для использования в системах автоматической обработки и цифровой передачи речи с радикальным сжатием данных на основе коэффициентов линейного предсказания.

Ключевые слова: акустические измерения, акустика речи, голосовой тракт, речевой сигнал, авторегрессионная модель, проблема малых выборок

Для цитирования: Савченко В. В. Совершенствование методики измерения показателя точности авторегрессионной модели речевого сигнала // Измерительная техника. 2022. № 10. С. 58–63. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-58-63>

Improving the method for measuring the accuracy indicator of the speech signal autoregressive model

Vladimir V. Savchenko

National Research University Higher School of Economics, N. Novgorod, Russia, vsavchenko@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-3045-3337>

Abstract. The problem of determining the accuracy of an autoregressive model of a speech signal is considered, and a method for measuring the accuracy index in the sliding observation window mode is proposed. As an indicator of the accuracy of the autoregressive model, a modified value of the COSH-distance (functions of the hyperbolic cosine) relative to the eponymous (one-phoneme) Schuster periodogram was used as a reference spectral sample. To study the possibilities of the proposed method, a full-scale experiment was set up and carried out, in which the object of study was a set of autoregressive models of different orders. These models were obtained by Berg's method for the vowel sounds of the controlled speaker's speech. According to the results of the measurements for each vowel, the optimal values of the autoregressive order and the corresponding optimal autoregressive model were found. It is shown that this optimization made it possible to increase the accuracy of the autoregressive model of the speech signal by more than 60 %, depending on the sound of the controlled speaker's speech and the characteristics of his vocal tract. The results obtained are intended for use in automatic processing and digital speech transmission systems with radical data compression based on linear prediction coefficients.

Keywords: acoustic measurements, speech acoustics, voice tract, speech signal, autoregressive model, small sample problem

Введение. Авторегрессионная модель речевого сигнала широко применяется в системах автоматической обработки и передачи речи по цифровым каналам связи в целях кодирования речевой информации с радикальным сжатием данных [1, 2]. В условиях априорной неопределённости тонкой структуры речевого сигнала авторегрессионную модель к нему адаптируют в режиме скользящего окна наблюдений [3, 4].

При этом длина τ окна строго ограничена сверху длительностью интервалов стационарности речевого сигнала [5]. Как следствие, на практике часто возникает проблема малых выборок [6, 7]. Она проявляется в недостаточной точности используемой авторегрессионной модели, в том числе, связанной с необоснованным выбором порядка $p < \infty$ [8]. Острота указанной проблемы становится особенно

очевидной, если учесть, что в теории отсутствует строгий критерий точности авторегрессионной модели, а существующие критерии, например Акаике, Шварца и др. [9], мало пригодны для применения к речевому сигналу, так как рассчитаны на однородные эргодические процессы. Поэтому актуальной является задача измерения показателя точности авторегрессионной модели по выборке конечного объема $N = \tau F$, где F – частота дискретизации наблюдений.

Цель исследования – разработка методологических основ оптимизации авторегрессионных моделей речевого сигнала с учётом его вариативности и особенности голосового тракта диктора [10, 11]. Статья написана в развитие результатов предыдущих работ [2, 3].

Постановка задачи. Поскольку авторегрессионная модель непосредственно связана с огибающей линейчатого спектра мощности речевого сигнала [12, 13], то определим этот спектр в пределах фрейма речи $x(n)$, где $n=0, 1, \dots, N-1$. При выборе способа спектрального анализа будем следовать логике работ [7, 14] и отдадим предпочтение дискретному фурье-преобразованию как разновидности линейной обработки сигналов, которая не связана с известными эффектами параметрических оценок спектра мощности: смещения и расщепления спектральных линий в условиях малых выборок наблюдений. Основанная на дискретном фурье-преобразовании периодограмма Шустера [15]:

$$G_x(f_m) = (FM)^{-1} \left| \sum_{n=0}^{M-1} x(n) \exp(-j2\pi n m M^{-1}) \right|^2, \quad (1)$$

$$m=0, 1, \dots, M-1$$

определяет мгновенную оценку спектра мощности (ОСМ) сигнала на выделенном наборе дискретных частот $f_m = m\Delta f = mM^{-1}F$. При равенстве $M = 2^k > N$, где k – некоторое целое число, периодограмма рассчитана на применение алгоритмов быстрого преобразования Фурье [16]. При этом только первые N из M отсчётов временного ряда $\{x(n)\}$ в правой части (1) отличны от нуля. Например, при длительности речевого фрейма $\tau = 20 \dots 30$ мс и частоте дискретизации $F = 8$ кГц (согласована с полосой пропускания стандартного телефонного канала связи) для $k = 10$ размерность составит $M = 1024 \gg N = 160 \dots 240$.

Согласно методологии параметрического спектрального анализа определим авторегрессионную модель в частотной области выражением общего вида [17]:

$$G_p(f_m) = \sigma_p^2 T \left| 1 - \sum_{i=1}^p a_p(i) \exp(-j2\pi i m M^{-1}) \right|^{-2}, \quad (2)$$

где $T = F^{-1}$; σ_p^2 – масштабный множитель; $a_p(i)$ – i -й элемент вектора коэффициентов линейной авторегрессии p -го порядка. Параметры σ_p^2 и $a_p(i)$ определяются по выборке $\{x(n)\}$ в соответствии с используемым методом спектрального анализа. Например, в методе Берга в указанных целях рекуррентная вычислительная процедура вида [15]:

$$\forall q = \overline{1, p}: a_q(i) = a_{q-1}(i) + c_q a_{q-1}(i-1), \quad i = \overline{1, q}; \quad (3)$$

$$c_q = \frac{2 \sum_{n=q}^{N-1} \eta_{q-1}(n) v_{q-1}(n-1)}{\sum_{n=q}^{N-1} [\eta_{q-1}^2(n) + v_{q-1}^2(n-1)]};$$

$$\eta_q(n) = \eta_{q-1}(n) + c_q v_{q-1}(n-1);$$

$$v_q(n) = v_{q-1}(n-1) + c_q \eta_{q-1}(n), \quad n = 0, 1, \dots, N-1,$$

применяется при её инициализации системой равенств

$$\forall n < N: v_0(n) = \eta_0(n-1) = x(n).$$

Финальные значения рекурсии (3) совместно с (2) определяют авторегрессионную модель спектральной огибающей $\bar{G}_x(f_m)$ речевого сигнала. Точность этой модели зависит от её порядка. Масштабный множитель σ_p^2 здесь роли не играет, поскольку никак не связан с формой спектральной огибающей. Поэтому задача состоит в определении показателя точности авторегрессионной модели (2) в зависимости от порядка p и его последующем измерении в режиме скользящего окна наблюдений $\{x(n)\}$.

Показатель точности. Перепишем выражение (2) в виде инверсного преобразования

$$G_p(f_m) = \sigma_p^2 T |A_p(jf_m)|^{-2}$$

квадрата модуля комплексного коэффициента передачи $A_p(jf_m)$ трансверсального фильтра p -го порядка

$$A_p(jf_m) = 1 - \sum_{i=1}^p a_p(i) \exp(-j2\pi i m M^{-1}), \quad m = \overline{0; M-1}. \quad (4)$$

Этот фильтр используем для выравнивания в частотной области огибающей $\bar{G}_x(f_m)$ периодограммы Шустера (1), которая выполняет в данном случае роль опорного спектрального образца [3]. Сигнал на выходе выравнивающего фильтра

$$G_y(f_m; p) = |A_p(jf_m)|^2 G_x(f_m) = \sigma_p^2 T \frac{G_x(f_m)}{G_p(f_m)}, \quad m = \overline{0; M-1}, \quad (5)$$

определяет ОСМ последовательности $\{y(n)\}$ импульсов возбуждения голосового тракта условного диктора в рамках обратной задачи речеобразования [18]: от речевого сигнала – к его голосовому источнику.

В идеале ОСМ (5) представляет собой прямоугольную последовательность $K = 0,5FF_0^{-1}$ гармонических составляющих со сдвигом между собой на частоту основного тона F_0 [19]. Однако на практике форма спектральной огибающей $\bar{G}_y(f_m; p)$ может существенно отличаться от прямоугольной, прежде всего из-за неидеальности используемой авторегрессионной модели (2). С указанной точки зрения принципиальное значение имеет порядок модели. Оптимизируем значение p в пределах конечного множества (R -множества) альтернатив $p_1 < p_2 < \dots < p_R$.

В основу оптимизации положим очевидное соображение: чем выше точность авторегрессионной модели, тем более ярко выражены в ОСМ (5) гармонические составляющие и тем более близка форма их огибающей $\{\bar{G}_y(f_m; p)\}$ к прямоугольной $G_0 = \text{const}$ для всех $m < M$. При учёте сказанного воспользуемся в качестве критериальной функции модифицированной мерой COSH-расстояния (COSH, hyperbolic cosine – функции гиперболического косинуса) $\rho(p)$ со свойством масштабной инвариантности в частотной области [20]:

$$\rho(p) = \sqrt{\left[M^{-1} \sum_{m=0}^{M-1} G_0 \bar{G}_y^{-1}(f_m; p) \right] \left[M^{-1} \sum_{m=0}^{M-1} \bar{G}_y(f_m; p) G_0^{-1} \right]} - 1 =$$

$$= M^{-1} \sqrt{\left[\sum_{m=0}^{M-1} \bar{G}_y^{-1}(f_m; p) \right] \left[\sum_{m=0}^{M-1} \bar{G}_y(f_m; p) \right]} - 1 \geq 0. \quad (6)$$

Мера (6) тождественно равна нулю при равенстве спектральной огибающей произвольной константе: $\bar{G}_y(f_m; p) = G_0 \forall m < M$. Как следует из результатов работы [3], именно в таком варианте ОСМ (5) точность авторегрессионной модели (2) будет максимальной. С увеличением $\rho(p)$ точность уменьшается. Мера (6) можно рассматривать в таком случае в роли объективного показателя точности формируемой авторегрессионной модели. Отсюда вытекает следующий критерий принятия решений в задаче оптимизации порядка модели на множестве R рассматриваемых альтернатив:

$$p^* = \text{Arg min}_{p \in R} \rho(p) \big|_{p=p_r}. \quad (7)$$

Оптимальная модель отвечает выражению (2) при выборе её порядка $p \leq p_R$ согласно правилу (7). Практическая реализация сводится к измерению показателя (6) в режиме скользящего окна наблюдений.

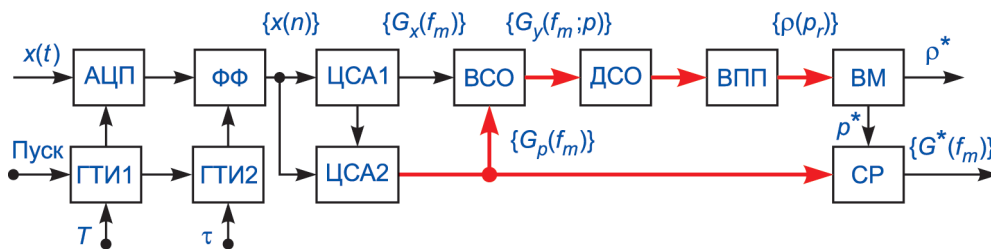


Рис. 1. Структурная схема устройства измерения показателя точности и оптимизации порядка авторегрессионной модели речевого сигнала:

АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ФФ – формирователь фреймов; ЦСА1, ЦСА2 – блоки цифрового спектрального анализа; ВСО – блок выравнивания спектральной огибающей; ДСО – детектор спектральной огибающей; ВПП – блок вычисления парциальных показателей; ВМ – схема выбора минимума; СП – блок считывания результата; ГТИ1, ГТИ2 – генераторы тактовых импульсов

Fig. 1. Block diagram of the device for measuring the quality indicator of the AR modeling of a speech signal:

ADC – analog-to-digital converter; FB – frame builder; DSA1, DSA2 – the digital spectral analysis blocks; SEF – spectral envelope flattening block; ED – envelope detector; BCPI – block for calculating partial indicators; MSS – minimum selection scheme; RR – result reading block; CPG1, CPG2 – the clock pulses generators

Метод измерений показателя точности. Структурная схема устройства для измерений показателя точности (6) и оптимизации порядка авторегрессионной модели (2) представлена на рис. 1. Устройство содержит последовательно соединённые элементы: аналого-цифровой преобразователь АЦП; формирователь фреймов ФФ; первый блок цифрового спектрального анализа ЦСА1; блоки выравнивания ВСО и детектирования ДСО спектральной огибающей; блоки вычисления ВПП и выбора минимума ВМ парциальных показателей точности, определения и считывания результата СР; два генератора тактовых импульсов ГТИ1, ГТИ2; второй блок ЦСА2. Красными линиями обозначены многомерные (размерностью M) функциональные связи. Регулируемые параметры устройства – период дискретизации T речевого сигнала и длина τ окна наблюдений.

Работа устройства начинается с запуска генераторов, необходимых для синхронизации работы отдельных элементов вычислительного процесса (3)–(6). С помощью генераторов периодически (с периодом τ) формируются и обновляются фреймы речевого сигнала $\{x(n)\}$ на входах блоков ЦСА1, ЦСА2. Соответственно, периодически будут обновляться ОСМ (1), (2) на их выходах. Причём согласно (2) модель обновляется одновременно в R разных вариантах $\{G_p(f_m)\}$ в зависимости от порядка $p = p_r$ для всех $r \leq R$, т. е. в соответствии с выражением (5) будет R вариантов спектральной огибающей $\bar{G}_y(f_m; p)$. Для их выделения в устройстве служит детектор спектральной огибающей. Его практическая реализация по схеме рециркулятора [16]:

$$\bar{G}_y(f_m; p) = b \bar{G}_y(f_m - \Delta f; p) + G_y(f_m; p), \quad m = \overline{1, M}, \quad (8)$$

основана на процедуре накопления или сглаживания речевого сигнала в частотной области. Константа b в правой части (8) влияет на инерционность такого накопления. Количественный показатель $\theta = -\Delta f / \ln b$ инерционности должен быть согласован с частотой F_0 основного тона речевого сигнала. Отсюда в первом приближении запишем

$$b = \exp(-\Delta f / F_0) = \exp(-F / (MF_0))$$

и, например, в диапазоне рабочих значений $F_0 = 100 \dots 200$ Гц [3] при $F = 8$ кГц, $M = 1024$ получим $b = 0,93 \dots 0,97$.

Основной результат работы устройства – показатель потенциально достижимой точности авторегрессионной модели (2) – формируется в R -канальной схеме блока ВМ (см. рис. 1) по критерию (7) выбора оптимального порядка. В соответствии с порядком p^* с помощью блока СР считывается оптимальная авторегрессионная модель $\{G^*(f_m)\}$.

Программа и результаты эксперимента. В эксперименте использован пилотный вариант устройства (см. рис. 1), реализованный на базе авторского программного обеспечения Phoneme Training¹. Программа размещена в открытом доступе, её интерфейс подробно описан в работе [11].

Объектом экспериментального исследования выбраны сигналы шести гласных звуков русской речи контрольного диктора – автора настоящей статьи. Достаточно большая (2–3 с) длительность каждого сигнала изначально рассчитана на его автоматическое последовательное членение на множество фреймов длительностью $\tau=30$ мс со сдвигом по времени на 10 мс. При частоте дискретизации $F=8$ кГц размерность фрейма N составила 240 отсчётов. Форма окна наблюдений – прямоугольная. В результате для каждого гласного звука речи сформирована представительная база данных объёмом $L=200\dots300$ одноимённых образцов. Далее по каждому образцу рассчитана периодограмма Шустера (1) размерностью $M=1024$ и с шагом по частоте $\Delta f=8000:1024=7,8125$ Гц. Параллельно в качестве авторегрессионной модели речевого сигнала определены спектральные оценки Берга (2) в $R=40$ альтернативных вариантах порядка $p=10\dots50$. В соответствии с рекурсией Левинсона (3) суммарная сложность вычислительной процедуры составила при этом порядка $3Np_R=3\cdot240\cdot50=36000$ элементарных операций умножения-сложения на интервале один речевой фрейм. Этот объём с запасом отвечает производительности современных речевых систем и технологий [21].

В процессе эксперимента для каждой из 40 альтернатив при $b=0,96$ согласно (8) получены оценки спектральной огибающей $\bar{G}_y(f_m; p)$, по которым в соответствии с критерием (7) были установлены оптимальное значение порядка p^* , соответствующая авторегрессионная модель (2) и показатель (6) её точности. Затем результаты усреднены по результатам L испытаний для каждой гласной фонемой контрольного диктора. В итоге относительная погрешность экспериментальных оценок [3] $\varepsilon=1,65L^{-1/2}=1,65(200\dots300)^{-1/2}$ при доверительной вероятности 0,9 составила не более 10–12 %.

На рис. 2 показан график рабочей характеристики $\rho(p)$ предложенного метода (1)–(7) применительно к гласному звуку речи «а». Вертикальные отрезки в контрольных точках данного графика определяют границы доверительного интервала значений показателя по результатам многократных измерений. Кривая $\rho(p)$ имеет единственный минимум $p^*=32$, что свидетельствует об эффективности критерия (7) и в целом метода акустических измерений. Достижимый эффект может быть охарактеризован значением выигрыша B по точности авторегрессионной модели (2) за счёт оптимизации её порядка p^* по отношению к его стандартному значению $p=10$ [2]:

$$B = \frac{\rho(10) - \rho^*}{\rho(10)} \cdot 100. \quad (9)$$

Согласно данным рис. 2 рассчитанное по формуле (9) значение составило $B=79,48\%$.

Для иллюстрации полученного результата на рис. 3 представлено семейство спектральных оценок Берга для авторегрессионных моделей порядков $p=10; 32; 50$ (кривые 1–3) в сравнении с периодограммой Шустера (кривая 4) на примере одного и того же (типичного) фрейма $\{x(n)\}$ гласного звука «а». Все кривые нормированы по средней мощности к единице. Оптимальной по точности является модель порядка $p=32$. На рис. 4 приведён соответствующий порядку $p=32$ график ОСМ (5) на выходе выравнивающего фильтра (4), а также огибающая $\bar{G}_y(f_m; p)$ (показана штриховой линией). Её форма близка к прямоугольной. Показатель (6) в данном случае характеризуется минимумом $\rho^*=\rho(32)\approx 0,04$ (см. рис. 2).

Сделанные выводы сохраняют справедливость и для остальных гласных звуков речи контрольного диктора. При этом их оптимальные по критерию (7) значения порядка модели могут сильно различаться между собой, например,

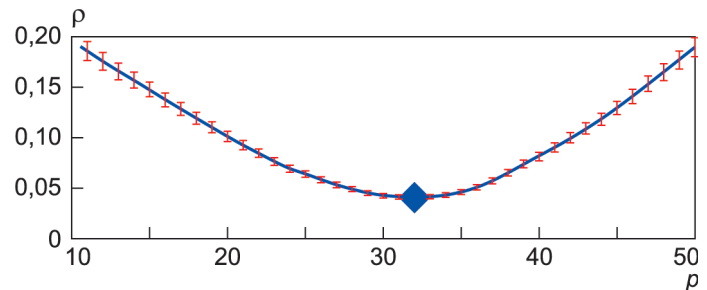


Рис. 2. Рабочая характеристика (с границами доверительного интервала по результатам многократных измерений показателя точности) предложенного метода измерения точности авторегрессионной модели на примере гласного звука «а» речи контрольного диктора

Fig. 2. The operating characteristic of the proposed method on the example of the vowel sound of speech “a” from the control speaker

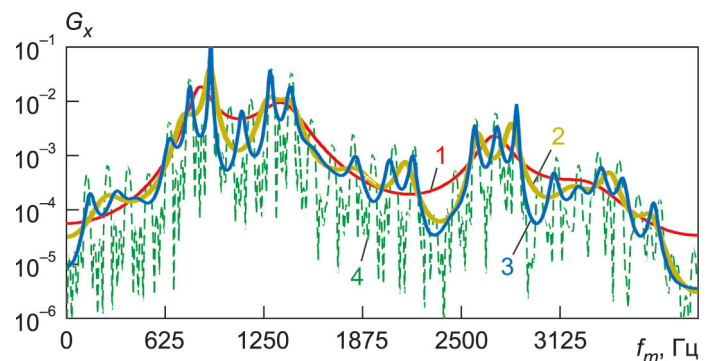


Рис. 3. Спектральные оценки Берга для авторегрессионных моделей порядков $p=10; 32; 50$ (кривые 1–3) гласного звука «а» в сопоставлении с периодограммой Шустера (кривая 4)

Fig. 3. Berg spectral estimates for the speech sound frame “a” of orders $p=10; 32; 50$ (curves 1–3) against the background of the Schuster periodogram (curve 4)

¹ Phoneme Training. Информационная система фонетического анализа и обучения речи [сайт]. URL: <https://sites.google.com/site/frompldcreators/produkty-1/phonemetraining> (дата обращения: 20.09.2022).

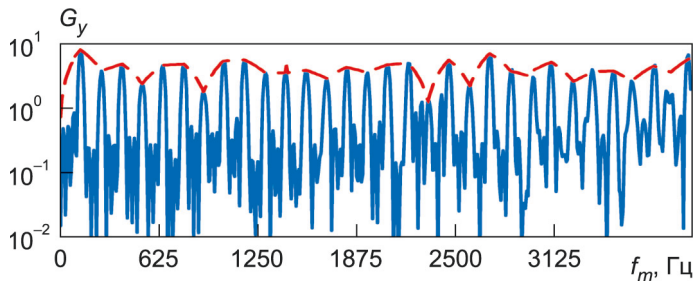


Рис. 4. Графики нормированной оценки спектра мощности (5) сигнала звука речи «а» на выходе выравнивающего фильтра (4) при порядке $p=32$ авторегрессионной модели

Fig. 4. Graphs of the normalized power spectrum estimation (5) of the speech sound signal "a" at the output of the flattening filter (4) when its order is $p=32$

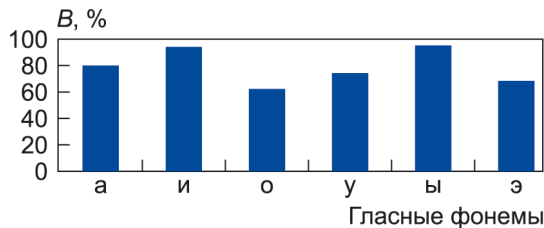


Рис. 5. Гистограмма распределения выигрыша B (9) по сигналам гласных фонем

Fig. 5. Histogram of distribution of payoff (9) by vowel phoneme signals

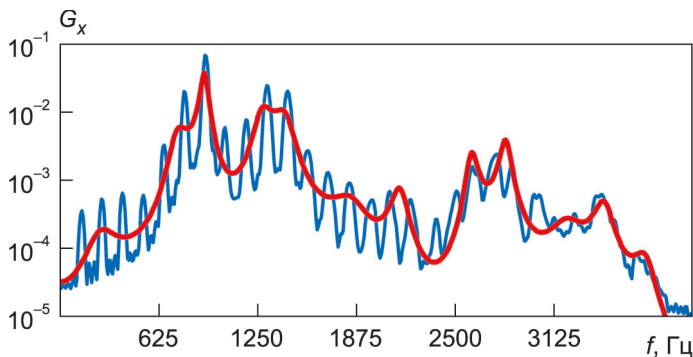


Рис. 6. Усреднённая периодограмма Шустера (синяя линия) в сравнении с оценкой Берга порядка $p=32$ (красная линия) на входе выравнивающего фильтра (4)

Fig. 6. The average Schuster periodogram (blue line) compared with the Berg estimate of the order $p=32$ (red line) at the input of the flattening filter (4)

для звука «о» имеем $p^*=22$. Различаются при этом и достигаемые в каждом случае значения выигрыша (9). Гистограмма их распределения по гласным фонемам представлена на рис. 5. Оптимизация позволила повысить точность авторегрессионной модели речевого сигнала более чем на 60 % в зависимости от звука речи контрольного диктора и особенностей его голосового тракта. Максимальный выигрыш достигнут для гласных звуков верхнего подъёма «и», «у», «ы», что можно отнести к особенности конкретного диктора.

Обсуждение полученных результатов. В отличие от метода Берга периодограмма Шустера в настоящее время почти не находит самостоятельного применения в задачах спектрального анализа временных рядов ввиду её не вполне подходящих статистических характеристик [15]. Вместо периодограммы Шустера в этих целях применяют методы Бартлетта, Уэлча и другие, основанные на эффекте усреднения периодограммных ОСМ по выборкам наблюдений достаточно большого объема $N \gg M$. Однако по условиям рассматриваемой в данной статье задачи выполняется прямо противоположное соотношение $M \gg N$, которое исключает статистическое усреднение и этим ограничивает возможности периодограммы Шустера в роли ОСМ речевого сигнала. Поэтому возникает закономерный вопрос в отношении обоснованности выражения (1) в качестве опорного спектрального образца. Ответом на него служат результаты второго, заключительного, этапа экспериментальных исследований, в рамках которого была изучена сравнительная эффективность предложенного выше метода в двух вариантах задания спектрального образца: в практически реализуемом варианте периодограммы (1), а также в умозрительном (гипотетическом) варианте Уэлча

$$G_x(f_m) = I^{-1} \sum_{i=1}^I G_x^{(i)}(f_m), \quad \forall m \leq M-1, \quad (10)$$

с I -кратным усреднением парциальных периодограмм Шустера на интервале наблюдений суммарной длительностью t/I . Здесь символом $G_x^{(i)}(f_m)$ обозначена парциальная периодограмма (1) в границах i -го речевого фрейма $\{x(n)\}$ конечного объема N .

Полученные результаты представлены на рис. 6 в виде графиков двух спектральных оценок сигнала фонемы «а» контрольного диктора: Уэлча (10) при $I=240$ (синяя линия) и Берга (красная линия) при оптимальном порядке $p^*=32$ модели (2). Оценка Берга не усреднялась, т. е. использовался один из фреймов $\{x(n)\}$, тем не менее она хорошо согласуется с огибающей усреднённой периодограммной оценки.

Огибающая ОСМ на выходе выравнивающего фильтра в данном случае не является более равномерной по сравнению с аналогичным графиком на рис. 4. Более того, показатель (6) её точности $\rho(32)=0,051$ не вышел за пределы соответствующего доверительного интервала $[0,02; 0,06]$ в точке оптимума рабочей характеристики (см. рис. 2). Отсюда можно сделать вывод, что усреднение периодограммы Шустера по методу Уэлча (10) почти ничего не даёт с точки зрения повышения точности формируемой авторегрессионной модели (2). Периодограмма Шустера в данном случае играет роль не итоговой ОСМ, а источника полезной информации в отношении тонкой структуры речевого сигнала. В этом качестве она безупречна в силу линейности обработки речевого сигнала при дискретном преобразовании Фурье [7].

Заключение. В результате проведённого исследования предложены показатель точности авторегрессионной модели речевого сигнала и метод его измерения в режиме скользящего окна наблюдений конечной длительности t . В рамках предпринятой оптимизации авторегрессионной

модели спектральная оценка Берга и периодограмма Шустера взаимно дополняют друг друга, хотя на практике они обычно конкурируют между собой [15, 17]. При этом критерий оптимизации впервые строго сформулирован в терминах обратной задачи речеобразования. В отличие от критериев типа AIC, BIC и им подобных [8, 9] предложенный критерий не требует синхронизации окна наблюдений с периодом основного тона речевого сигнала, что сильно ослабляет остроту проблемы априорной неопределённости [3].

Полученные результаты предназначены для использования в системах автоматической обработки и цифровой передачи речи с радикальным сжатием данных на основе коэффициентов линейного предсказания [1, 2].

Список источников / References

1. Gibson J., *Entropy*, 2018, vol. 20, no. 10, 7502018. <https://doi.org/10.3390/e20100750>
2. Savchenko V. V., *Radioelectronics and Communications Systems*, 2021, vol. 64, no. 11, pp. 592–603. <https://doi.org/10.3103/S0735272721110030>
3. Савченко А. В., Савченко В. В. Адаптивный метод измерения частоты основного тона с использованием двухуровневой авторегрессионной модели речевого сигнала // *Измерительная техника*. 2022. № 6. С. 60–66. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-6-60-66> [Savchenko V. V., Savchenko A. V., An adaptive method for measuring the pitch frequency using a two-level autoregressive model of a speech signal, *Izmeritel'naya tekhnika*, 2022, no. 6, pp. 60–66. (In Russ.)].
4. Jaramillo E., Nielsen J. K., Christensen M. G., *27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2019, pp. 1–5. <https://doi.org/10.23919/EUSIPCO.2019.8902763>
5. Савченко В. В. Исследование стационарности случайных временных рядов с использованием принципа минимума информационного рассогласования // *Известия вузов. Радиофизика*. 2017. Т. 60. № 1. С. 89–96. [Savchenko V. V., *Radio-physics and Quantum Electronics*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 89–96. <https://doi.org/10.1007/s11141-017-9778-y>].
6. Cui S., Li E., Kang X., *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, London, United Kingdom, 2020, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICME46284.2020.9102765>
7. Ando Sh., *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, vol. 146, no. 11, 2846. <https://doi.org/10.1121/1.5136873>
8. Savchenko V. V., Savchenko A. V., *Radioelectronics and Communications Systems*, 2019, vol. 62, no. 5, pp. 276–286. <https://doi.org/10.3103/S0735272719050042>

9. Ding J., Tarokh V., Yang Y., *IEEE Transactions on Information Theory*, 2018, vol. 64, no. 6, pp. 4024–4043. <https://doi.org/10.1109/TIT.2017.2717599>

10. Savchenko V. V., *Radioelectronics and Communications Systems*, 2020, vol. 63, pp. 532–542. <https://doi.org/10.3103/S0735272720100039>

11. Савченко В. В., Савченко Л. В. Метод измерений показателя разборчивости речевого сигнала в информационной метрике Кульбака-Лейблера // *Измерительная техника*. 2019. № 9. С. 59–64.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-9-59-64> [Savchenko V. V., Savchenko L. V., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 9, pp. 832–839. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01702-1>].

12. Tohyama M., Spectral envelope and source signature analysis, in: *Acoustic Signals and Hearing*, Academic Press, 2020, pp. 89–110. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816391-7.00013-9>

13. Sun P., Mahdi A., Xu J., Qin J., *Speech Communication*, 2018, vol. 101, pp. 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2018.05.006>

14. Савченко В. В., Савченко Л. В. Метод авторегрессионного моделирования речевого сигнала на основе его дискретного фурье-преобразования и масштабно-инвариантной меры информационного рассогласования // *Радиотехника и электроника*. 2021. Т. 66. № 11. С. 1100–1108. <https://doi.org/10.31857/S0033849421110085> [Savchenko V. V., Savchenko L. V., *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2021, vol. 66, no. 11, pp. 1266–1273. <https://doi.org/10.1134/s1064226921110085>].

15. Marple S. L., *Digital spectral analysis with applications*, 2nd ed., Mineola, New York, Dover Publications, 2019, 432 p.

16. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: Справочник / Под ред. Я. Д. Ширмана. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2007, 657 с. [Radioelektronnyye sistemy. Osnovy postroeniya i teoriya: Spravochnik, Ed. Ya. D. Shirman, 2nd ed., Moscow, Radiotekhnika Publ., 2007, 657 c. (In Russ.)].

17. Benesty J., Chen J., Huang Y., Linear Prediction, in: *Springer handbook of speech processing, Part B*, N.Y., Springer, 2008, pp. 111–124. https://doi.org/10.1007/978-3-540-49127-9_7

18. Palaparthi A., Titze I. R., *Speech Communication*, 2020, vol. 123, pp. 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2020.07.003>

19. Rabiner L. R., Shafer R. W., *Theory and Applications of Digital Speech Processing*, Boston, Pearson, 2010, 1060 p.

20. Savchenko A. V., Savchenko V. V., Savchenko L. V., *Optimization Letters*, 2021, no. 7. <https://doi.org/10.1007/s11590-021-01790-5>

21. Kumar S., Singh S. K., Bhattacharya S., *International Journal of Speech Technology*, 2015, vol. 18, pp. 521–527. <https://doi.org/10.1007/s10772-015-9296-2>

Статья поступила в редакцию 30.06.2022; одобрена после рецензирования 06.09.2022; принята к публикации 08.09.2022. The article was submitted 30.06.2022; approved after reviewing 06.09.2022; accepted for publication 08.09.2022.

Референтная методика измерений содержания фталатов в полимерных матрицах: аналитические и метрологические подходы

Анатолий Иванович Крылов¹, Александра Германовна Будко^{2✉}, Алена Юрьевна Михеева³, Ирина Юрьевна Ткаченко⁴, Геннадий Рувимович Нежиховский⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия

¹a.i.krylov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2273-1328>

²a.g.budko@vniim.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-4288-2916>

³a.mikheeva@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1032-5653>

⁴i.y.tkachenko@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4079-6301>

Аннотация. Рассмотрены проблемы загрязнения фталатами окружающей среды и влияния фталатов на здоровье человека. Описан процесс разработки Референтной методики измерений массовой доли шести приоритетных фталатов (диметилфталата, диэтилфталата, ди(н-бутил)фталата, бензилбутилфталата, ди(2-этилгексил)фталата и ди(н-октил)фталата) в объектах на основе поливинилхлорида методом газовой хроматографии/масс-спектрометрии с изотопным разбавлением РМИ ВНИИМ-243-01-2019. Обсуждены этапы измерительной процедуры и пути их оптимизации с целью повышения точности результатов измерений. Изучены источники неопределённости, минимизированы вклады всех составляющих в суммарную стандартную неопределённость результатов измерений, полученных по РМИ ВНИИМ-243-01-2019. Установлены метрологические характеристики РМИ ВНИИМ-243-01-2019: диапазон измерений 10–5000 мг/кг; среднее квадратическое отклонение в условиях повторяемости и промежуточной прецизионности 2 и 3 % соответственно; относительная расширенная неопределённость 6–8 %. Методика предназначена для установления метрологических характеристик стандартных образцов матриц, контроля правильности результатов измерений, полученных с использованием других методик (методов) измерений аналогичных величин, и выполнения измерений в арбитражных целях. В качестве объективного подтверждения соответствия РМИ ВНИИМ-243-01-2019 представлены результаты ключевых международных сличений CCQM-K133 “Phthalate esters in Polyvinyl Chloride (PVC)”.

Ключевые слова: референтная методика измерений, стандартный образец, фталаты, масс-спектрометрия с изотопным разбавлением, поливинилхлорид

Для цитирования: Крылов А. И., Будко А. Г., Михеева А. Ю., Ткаченко И. Ю., Нежиховский Г. Р. Референтная методика измерений содержания фталатов в полимерных матрицах: аналитические и метрологические подходы // Измерительная техника. 2022. № 10. С. 64–72. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-64-72>

Reference method for measuring the content of phthalates in polymer matrices: analytical and metrological approaches

Anatoliy I. Krylov¹, Aleksandra G. Budko^{2✉}, Alena Y. Mikheeva³, Irina Y. Tkachenko⁴, Gennady R. Nezhikhovskiy⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

¹a.i.krylov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2273-1328>

²a.g.budko@vniim.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-4288-2916>

³a.mikheeva@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1032-5653>

⁴i.y.tkachenko@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4079-6301>

Abstract. The article presents information on the development of a reference method of measurements (RMM) the mass fraction of ethers of orto-phthalic acid (dimethyl phthalate, diethyl phthalate, di(n-butyl)phthalate, benzylbutyl phthalate, di(2-ethylhexyl)phthalate and di(n-octyl)phthalate) in polymer matrices based on polyvinyl chloride by gas chromatography/mass spectrometry with isotopic dilution. The research materials of each stage of the measurement procedure and the parameters of their optimization in terms of improving the accuracy of the measurement results of the RMM are presented. The sources of uncertainty are studied and the contributions of all components to the total standard uncertainty of the RMM measurement results are minimized. Metrological characteristics of RMM have been established: the measurement range is from 10 mg/kg to 5000 mg/kg, the standard deviation (SD) under repeatability conditions is 2 %, the SD under intermediate precision conditions is 3 %, the relative extended uncertainty is from 6 to 8 %. The results of the key international comparisons CCQM-K133 “Phthalate esters in Polyvinyl Chloride (PVC)” are presented as an objective confirmation of compliance with the RMM.

Keywords: reference method of measurements, phthalates, isotopic dilution mass spectrometry, polyvinyl chloride

Введение. Сложные эфиры ортофталевой кислоты (фталаты) относятся к крупнотоннажным продуктам химической промышленности и применяются в качестве смазочных масел, пеногасящих веществ, растворителей и носителей в различных производственных процессах, а также при изготовлении косметических средств. Фталаты широко распространены как пластификаторы в изделиях из поливинилхлорида (ПВХ) при производстве различных полимерных материалов промышленного, бытового, пищевого и медицинского назначений, например, детских игрушек, средств личной гигиены, строительных материалов, упаковок для пищевых продуктов и т. д. (ГОСТ 8728-88¹, ГОСТ Р 50962-96²). Из всего разнообразия используемых фталатов шесть конгенеров группы, как наиболее распространённые и негативно влияющие на здоровье человека, отнесены к приоритетным загрязнителям окружающей среды (см. [1–4], а также зарубежный³ и российский⁴ документы).

Комитет Европарламента по окружающей среде принял план контроля содержания фталатов в материалах и изделиях, контактирующих с пищевыми продуктами (см. [5], статью⁵), в Европейском союзе продолжается работа над законом о полном запрете использования фталатов в большей части изделий из пластмасс, в том числе при производстве детских игрушек. В Российской Федерации также действует ряд нормативно-правовых документов, регламентирующих содержание фталатов в воде, воздухе (СанПиН 1.2.3685-21⁶, Приказ Министерства сельского хозяйства России⁷) и продукции, предназначенной для детей и подростков (ТР ТС 007/2011⁸, ТР ТС 005/2011⁹, ТР ТС 008/2011¹⁰).

Вода является продуктом ежедневного и практически бесконтрольного потребления. Как показывают

исследования, выполненные в разных странах в разное время независимыми группами аналитиков, фталаты присутствуют практически во всех пробах бутилированной воды, независимо от страны-производителя [6–8]. Данный факт заставляет обратить особое внимание на безопасность упаковочных материалов, которые могут быть потенциальным источником опасности в результате миграции химических компонентов в упакованные продукты.

Фталаты присутствуют в большинстве полимерных материалов, применяющихся при отделке зданий (линолеум, обои, элементы интерьера и т. д.), и в процессе эксплуатации изделий постепенно мигрируют в атмосферу. Также немалый вклад в загрязнение воздуха вносят испарения косметики, особенно когда в помещении находятся десятки, а то и сотни людей [4], СанПин 1.2.3685-21. В результате повсеместного использования полимерных предметов обихода фталаты обнаруживаются как в селитебных зонах многомиллионных городов [9], так и в более отдалённых от индустриализации местах [10].

Особое внимание контролирующих организаций и общественности сосредоточено на предназначенных для детей предметах. Они отнесены к особой категории продукции, требования к процедуре оценки соответствия которой значительно выше, в том числе по содержанию химических компонентов в целом и фталатов в частности.

Таким образом, проблема загрязнения фталатами окружающей среды, а также влияния фталатов на здоровье человека является актуальной и интернациональной.

На текущий момент в Российской Федерации существует немало методик, предназначенных для определения фталатов в различных средах (МУК 4.1.3160-14¹¹, ГОСТ 25779-90¹², МУК 4.1.738-99¹³, МУК 4.1.614-96¹⁴,

¹ ГОСТ 8728-88. Пластификаторы. Технические условия.

² ГОСТ Р 50962-96. Посуда и изделия хозяйственного назначения из пластмасс. Общие технические условия (с изменениями).

³ U.S. Congress enacted the Consumer Product Safety Improvement Act (CPSIA 2008): [сайт]. URL: <http://www.cpsc.gov/about/cpsia/cpsia.html> (дата обращения: 12.10.2022).

⁴ О внесении изменений в технический регламент Таможенного союза «О безопасности парфюмерно-косметической продукции» (ТР ТС 009/2011): [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420331180> (дата обращения 12.10.2022).

⁵ Газета «Известия»: [сайт]. URL: <https://iz.ru/861377/2019-03-27/evroparlament-odobril-zapret-na-plastikovye-stakanchiki> (дата обращения: 12.10.2022).

⁶ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

⁷ Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

⁸ ТР ТС 007/2011 «О безопасности продукции, предназначенной для детей и подростков»: [сайт]. URL: http://www.eurasiancommission.org/ru/Lists/EECDocs/P_797_1.pdf (дата обращения 12.10.2022).

⁹ ТР ТС 005/2011 «О безопасности упаковки»: [сайт]. URL: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/tehnreg/deptexreg/tr/Documents/TR%20TS%20Upakovka.pdf> (дата обращения 12.10.2022).

¹⁰ ТР ТС 008/2011 «О безопасности игрушек»: [сайт]. URL: http://www.eurasiancommission.org/ru/Lists/EECDocs/P_798_3.pdf (дата обращения 12.10.2022).

¹¹ МУК 4.1.3160-14. Измерение массовых концентраций фталатов (диметилфталата, диэтилфталата, дибутилфталата, бензилбутилфталата, ди(2-этилгексил)фталата) в молоке методом высокоэффективной жидкостной хроматографии: Методические указания.

¹² ГОСТ 25779-90. Игрушки. Общие требования безопасности и методы контроля.

¹³ МУК 4.1.738-99. Хромато-масс-спектрометрическое определение фталатов и органических кислот в воде.

¹⁴ МУК 4.1.614-96. Методические указания по определению диэтилфталата в атмосферном воздухе методом высокоэффективной жидкостной хроматографии.

МУК 4.1.3168-14¹⁵, МР 01.025-07¹⁶, МУ 4077-86¹⁷, ГОСТ 33451-2015¹⁸, МВИ МН 1402-2000¹⁹, ГОСТ 26150-84²⁰), в которых изложены самые разные подходы и аналитические техники. Референтная методика измерений (РМИ) сочетает наилучшие аналитические технологии и наивысшую точность измерений, её применение позволяет установить чёткую иерархию нормативных документов и упростить разрешение спорных ситуаций.

Общие требования к РМИ изложены в Приказе Министерства промышленности и торговли РФ № 4091²¹, частные требования, учитывающие специфику конкретной задачи, сформулированы по результатам анализа нормативных документов (ГОСТ 25779-90, МУК 4.1.738-99, МУК 4.1.614-96, МУК 4.1.3168-14, МР 01.025-07, МУ 4077-86, ГОСТ 33451-2015, МВИ МН 1402-2000, ГОСТ 26150-84, ISO 14389:2014²², ISO 8124-6:2018²³, ISO/TS 16181:2011²⁴) следующим образом:

аналитами являются шесть приоритетных фталатов – диметилфталат (ДМФ), диэтилфталат (ДЭФ), ди(н-бутил)фталат (ДБФ), бензилбутилфталат (ББФ), ди(2-этилгексил)фталат (ДЭГФ) и ди(н-октил)фталат (ДОФ);

диапазон измерений 10–5000 мг/кг обеспечивает контроль правильности результатов измерений, полученных с использованием других методик измерений аналогичных величин (ГОСТ Р ИСО 14389-2016²⁵, ГОСТ Р ИСО 16181-2015²⁶);

относительная расширенная неопределённость измерений не более 15 % гарантирует достаточный запас по точности относительно рутинных методик измерений (ГОСТ Р ИСО 14389-2016, ГОСТ Р ИСО 16181-2015);

измерительная процедура предполагает использование наилучшего на данный момент аналитического метода, позволяющего достичь наивысшей точности результатов измерений;

результаты измерений метрологически прослеживаются к Государственному первичному эталону единиц массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации органических компонентов в жидких и твёрдых веществах и материалах на основе жидкостной и газовой хромато-масс-спектрометрии с изотопным разбавлением и гравиметрии ГЭТ 208-2019²⁷ и Государственному первичному эталону единицы массы ГЭТ 3-2008²⁸.

Цель статьи – представить разработанную Референтную методику измерений массовой доли шести приоритетных фталатов (диметилфталата, диэтилфталата, ди(н-бутил)фталата, бензилбутилфталата, ди(2-этилгексил)фталата и ди(н-октил)фталата) в объектах на основе поливинилхлорида методом газовой хроматографии/масс-спектрометрии с изотопным разбавлением РМИ ВНИИМ-243-01-2019 (Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 2734²⁹) (далее – РМИ) и детально рассмотреть процесс оптимизации всех этапов измерительной процедуры для достижения наилучших точностных характеристик РМИ.

Выбор оптимальных методических решений. В России в большинстве случаев фталаты измеряют не напрямую в полимерных материалах (которые и являются потенциальными источниками фталатов), а опосредованно – в смесях в модельные среды, имитируя таким образом способ

¹⁵ МУК 4.1.3168-14. Газохроматографическое определение диметилфталата, диметилтерефталата, диэтилфталата, дибутилфталата, бутилбензилфталата, бис(2-этилгексил)фталата и диоктилфталата в атмосферном воздухе, воздухе испытательной камеры и замкнутых помещений.

¹⁶ МР 01.025-07. Газохроматографическое определение диметилфталата, диметилтерефталата, диэтилфталата, дибутилфталата, бутилбензилфталата, бис(2-этилгексил)фталата и диоктилфталата в водных вытяжках из материалов различного состава.

¹⁷ МУ 4077-86. Методические указания по санитарно-гигиеническому исследованию резин и изделий из них, предназначенных для контакта с пищевыми продуктами.

¹⁸ ГОСТ 33451-2015. Упаковка. Определение содержания диоктилфталата, дибутилфталата методом газовой хроматографии в модельных средах.

¹⁹ МВИ МН 1402-2000. Методика выполнения измерений концентраций дибутилфталата и диоктилфталата в водной и водно-спиртовых средах методом газовой хроматографии.

²⁰ ГОСТ 26150-84. Материалы и изделия строительные полимерные отделочные на основе поливинилхлорида. Метод санитарно-химической оценки.

²¹ Приказ Министерства промышленности и торговли РФ № 4091 от 15.12.2015 г. «Об утверждении Порядка аттестации первичных референтных методик (методов) измерений, референтных методик (методов) измерений и методик (методов) измерений и их применения».

²² ISO 14389:2014. Textiles – Determination of the phthalate content – Tetrahydrofuran method.

²³ ISO 8124-6:2018. Safety of toys – Part 6: Certain phthalate esters in toys and children's products.

²⁴ ISO/TS 16181:2011. Footwear – Critical substances potentially present in footwear and footwear components – Determination of phthalates in footwear materials.

²⁵ ГОСТ Р ИСО 14389-2016. Материалы текстильные. Определение содержания фталатов. Метод с применением тетрагидрофурана.

²⁶ ГОСТ Р ИСО 16181-2015. Обувь. Критические вещества, потенциально присутствующие в обуви и её деталях. Метод определения содержания фталатов в обувных материалах.

²⁷ Приказ Министерства промышленности и торговли № 3390 от 27.12.2019 г. «Об утверждении Государственного первичного эталона единиц массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации органических компонентов в жидких и твёрдых веществах и материалах на основе жидкостной и газовой хромато-масс-спектрометрии с изотопным разбавлением и гравиметрии».

²⁸ Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 439 от 6 февраля 2009 г. «Об утверждении Государственного первичного эталона единицы массы (килограмма)».

²⁹ Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 2734 от 18 ноября 2019 г. «Об утверждении референтной методики измерений массовой доли шести приоритетных фталатов (диметилфталата, диэтилфталата, ди(н-бутил)фталата, бензилбутилфталата, ди(2-этилгексил)фталата и ди(н-октил)фталата) в объектах на основе поливинилхлорида методом газовой хроматографии/масс-спектрометрии с изотопным разбавлением».

взаимодействия объекта с полимером, например, тарой или детской игрушкой (МР 01.025-07, МУ 4077-86, ГОСТ 33451-2015, МВИ МН 1402-2000, ГОСТ 26150-84). Естественным недостатком такого способа измерений является невозможность учёта всех возможных вариаций реальных сред, которые могут вступать в контакт с материалом.

Зарубежные методики измерений (ISO 14389:2014, ISO 8124-6:2018, ISO/TS 16181:2011) предполагают определение фталатов напрямую в полимере (первоисточнике загрязнения), полностью исключая стадию моделирования, что повышает надёжность и информативность результатов измерений. По этой причине в качестве объекта измерений РМИ принят полимерный материал ПВХ – популярный и распространённый пластик.

Поскольку область применения РМИ включает измерения в арбитражных целях и аттестацию матричных стандартных образцов (СО) метрологического назначения, используемый аналитический метод должен гарантировать получение результатов измерений с наилучшими метрологическими характеристиками. В рассматриваемом случае выбран метод газовой хроматографии и масс-спектрометрии с изотопным разбавлением, признанный условно первичным [11, 12]. Техника изотопного разбавления предполагает внесение в пробу изотопно-меченых аналогов аналитов – суррогатных внутренних стандартов, которые полностью имитируют поведение нативных веществ. Такой подход позволяет учесть возможные потери аналитов при выполнении пробоподготовки

(неколичественное перенесение, неполноту элюирования из сорбентов, потери при концентрировании, утрату части пробы), а также в процессе инструментального анализа, компенсируя нестабильность работы аналитического оборудования и, как следствие, минимизировать неопределённость измерений на всех этапах анализа.

Метрологическая прослеживаемость результатов измерений в органическом анализе достигается использованием для градуировки (калибровки) аналитического оборудования СО (калибрантов), прослеживаемых к эталонам соответствующих единиц величин, в международной практике – сертифицированных референтных материалов (certified reference material, CRM) национальных метрологических институтов (NIST³⁰, NIM³¹, CERJ³²). В России на момент проведения исследований аналогичные отечественные СО отсутствовали, и в сложившейся ситуации было принято решение создать СО, который бы полностью удовлетворял требованиям РМИ [13]. Работа выполнена во ВНИИМ на ГЭТ 208-2019. Метрологические характеристики СО состава раствора шести приоритетных фталатов в метаноле ГСО 11366-2019:

интервал допускаемых аттестованных (сертифицированных) значений массовой концентрации индивидуальных фталатов (1,9–2,1) г/дм³ или (2,40–2,65) г/кг;

относительная расширенная неопределённость не более 2 % при коэффициенте охвата $k=2$ (соответствует границам допускаемой относительной суммарной погрешности ($\pm\delta$, %) при $P=0,95$).

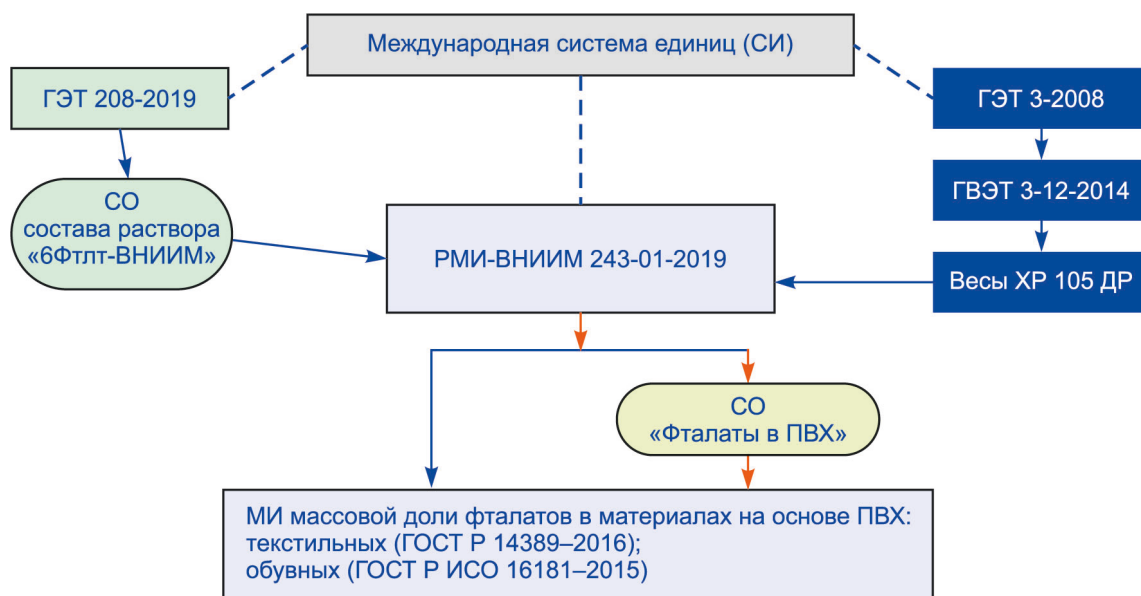


Рис. 1. Иерархическая схема метрологической прослеживаемости результатов измерений по РМИ ВНИИМ-243-01-2019

Fig. 1. Hierarchical scheme of metrological traceability of measurement results according to RMI VNIIM-243-01-2019

³⁰ SRM 3074 «Phthalates in Methanol»: [сайт]. URL: <https://www-s.nist.gov/m-srmors/certificates/3074.pdf> (дата обращения 12.10.2022).

³¹ CRM №№ GBW(E)100221 – GBW(E)100226: [сайт]. URL: <https://www.ncrm.org.cn/> (дата обращения 12.10.2022).

³² CRM №№ CERJcss-0569 – CERJcss-0576, №CERJcss-0619: [сайт]. URL: https://unit.aist.go.jp/qualmanmet/refmate/rminfo/RMinfo/pages/4_j.html (дата обращения 12.10.2022).

Иерархическая схема метрологической прослеживаемости результата измерения, полученного по РМИ, представлена на рис. 1. Массовая доля W фталата в объекте измеряется согласно РМИ методом косвенных измерений (в миллиграммах, делённых на килограмм). Масса фталата (в миллиграммах) вычисляется по значению массовой доли фталата в СО, прослеживаемом к ГЭТ 208-2019. Масса объекта на основе ПВХ определяется по показаниям весов, откалиброванных по Государственному вторичному эталону единицы массы в диапазоне номинальных значений от $1 \cdot 10^{-6}$ кг до 20 кг ГВЭТ 3-12-2014 (2.1.ZZB.0022.2014), который получает единицу массы от ГЭТ 3-2008.

Оптимизация экспериментальных параметров. Условия измерений выбирали с учётом требований полного отделения аналитов от сопутствующих соединений и регистрации аналитических сигналов на нижнем уровне диапазона измерений РМИ. Измерения выполняли на газовом хроматографе Agilent 7890B с масс-спектрометрическим детектором Agilent 5977B (Agilent Technologies, США). Поскольку хроматографическое разделение аналитов не составляет сложности, для анализа использовали универсальную хроматографическую колонку HP-5MS со слабополярной фазой (стандартные размеры колонки $30 \text{ м} \times 0,25 \text{ мм} \times 0,25 \text{ мкм}$), которая пригодна для решения многих задач аналитической химии, в том числе, для определения фталатов. Параметры работы системы «газовый хроматограф – масс-спектрометр» приведены ниже, температура интерфейса системы 250 °С.

Параметры работы газового хроматографа

Газ-носитель.....	гелий
Объём вводимой пробы.....	1 мм ³
Режим работы испарителя.....	деление потока 50:1
Температура испарителя.....	250 °С
Температура термостата	
начальная.....	50 °С
промежуточная.....	250 °С
конечная.....	300 °С
Выдержка при температурах термостата	
начальной и промежуточной.....	по 1 мин
конечной.....	15 мин
Скорость нагрева до температуры термостата	
промежуточной.....	20 °С/мин
конечной.....	2 °С/мин

Параметры работы масс-спектрометра

Ионизация.....	электронная
Температура источника ионов.....	230 °С
Энергия электронов.....	70 эВ
Режим сканирования.....	селективное ионное детектирование
Время регистрации ионов одной массы.....	0,1 с

Масс-спектрометр является универсальным детектором для ионизируемых веществ, но в режиме регистрации выбранных ионов (Selected Ion Monitoring – SIM) работает как селективный регистратор определённой группы компонентов,

что существенно повышает избирательность метода и уменьшает предел детектирования. Для группы фталатов (за исключением ДМФ) характеристичным и самым интенсивным в масс-спектре является ион с отношением массы к заряду $m/z=149$, в настоящем исследовании его принимали в качестве основного иона (ОИ) для количественного анализа, подтверждающие ионы (ПИ) применяли для повышения надёжности идентификации компонентов. Параметры режима регистрации выбранных ионов приведены в табл. 1.

Традиционная многоуровневая градуировка информативна, но вносит дополнительный вклад в неопределённость измерений, обусловленный нелинейностью градуировочной характеристики в широком диапазоне. Градуировка в точке (или выбранном узком диапазоне) позволяет минимизировать этот вклад и, следовательно, улучшить точностные характеристики методики измерений, что в рассматриваемом случае является приоритетом. В РМИ реализованы оба вида градуировки, при этом многоуровневая градуировочная зависимость используется для предварительных измерений, а точечная выполняется на основании предварительных изменений в диапазоне не более $\pm 10 \%$ от предполагаемого результата. При градуировке в точке внесённое количество внутреннего стандарта и присутствующее в пробе количество аналита одинаковы или максимально близки. Калибрانت – ГСО 11366 – создавали в рамках разработки РМИ целенаправленно для обеспечения прослеживаемости получаемых по РМИ результатов измерений массовой доли фталатов к соответствующим единицам величин, воспроизводимым на ГЭТ 208-2019. В качестве внутренних стандартов использовали коммерчески доступные изотопно-меченые аналоги аналитов (ring-D₄). Нормативы контроля градуировочных характеристик, установленные относительно среднего квадратического отклонения (СКО) факторов отклика, составили для многоуровневой градуировки и градуировки в точке не более 8 и 2 % соответственно.

Фталаты не образуют прочных связей с молекулами полимера и способны мигрировать из готовых изделий

Таблица 1

Параметры режима регистрации выбранных ионов

Фталат	ОИ, m/z	ПИ, m/z
Аналит:		
ДМФ	163	194
ДЭФ	149	177
ДБФ	149	223
ББФ	149	206
ДЭГФ	149	279
ДОФ	149	279
Внутренний стандарт:		
ДМФ (ring-D ₄)	167	198
ДЭФ (ring-D ₄)	153	181
ДБФ (ring-D ₄)	153	227
ББФ (ring-D ₄)	153	210
ДЭГФ (ring-D ₄)	153	283
ДОФ (ring-D ₄)	153	283

в окружающую среду. Это существенно влияет на содержание фталатов в лабораторных помещениях, источниками фталатов являются лабораторная мебель, покрытия стен, пола, потолков и т. д. [14], а также реактивы и аналитические материалы. По этой причине предел определения фталатов обусловлен не возможностями измерительной техники, а содержанием фталатов в лабораторном фоне.

Фталатный фон лабораторной посуды стабилизировали и минимизировали с помощью специальной процедуры подготовки, состоящей из ополаскивания метанолом (растворитель с минимальным (не более 7 мкг/дм³) содержанием фталатов), прокаливания в муфельной печи и хранения посуды в эксикаторе над активированным углем. Срок хранения (24 ч) устанавливали экспериментально по результатам анализа смывов с посуды (по истечению этого времени фон становится нестабильным, что может исказить результаты измерений).

Процесс предварительной подготовки образцов находился вне рассмотрения РМИ, поэтому принимали, что материал измельчён и усреднён в соответствии с нормативными документами (ГОСТ Р ИСО 14389-2016, ГОСТ Р ИСО 16181-2015), т. е. образец является представительным в любом количестве, которое может быть взвешено с приемлемой неопределённостью. Работа с небольшими навесками естественным образом сокращает содержание сопутствующих матричных компонентов в экстракте, позволяет их эффективно удалять и, как следствие, понизить фоновый сигнал аналитического оборудования. При этом навеска образца (проба) должна гарантировать определение аналитов на нижней границе диапазона измерений РМИ. Таким образом, необходимо установить минимальную (для сокращения содержания матричных компонентов) и достаточную (для достижения нижней границы диапазона измерений) массу навески в условиях установленной гомогенности пробы.

Возможности используемого аналитического оборудования позволяют обеспечить измерение аналитов на уровне 0,3 нг (соотношение сигнал/шум S/N не менее 3:1) при отсутствии матричных эффектов. С учётом принятых характеристик процедуры измерений (объём вводимой пробы 1 мм³, объём конечного экстракта около 15 см³, аналитический сигнал не менее $S/N=10$) рассчитанная минимальная масса навески составила 0,05 г.

Значимый вклад в суммарную неопределённость результата измерений вносит дисперсия интегрирования хроматографических пиков, при этом интенсивность сигнала и дисперсия обычно связаны обратной зависимостью. Для уменьшения дисперсии проводили эксперименты, в которых варьировали массу навески от минимальной расчётной до 0,2 г, в результате получили оптимальную массу пробы 0,1 г.

Извлечение аналитов из матрицы – ключевая стадия подготовки проб. Органические аналиты экстрагируют из твёрдых образцов с помощью ультразвукового (УЗ) поля, аппарата Сокслета, с помощью систем ускоренной экстракции горячим растворителем при повышенном давлении (Accelerated Solvent Extraction) и т. д. Однако особенность

полимеров на основе ПВХ заключается в их хорошей растворимости в органических веществах, что обеспечивает полное вскрытие матрицы и высокую степень извлечения целевых соединений. Согласно данным [15] ПВХ растворим в тетрагидрофуране (ТГФ), дихлорэтано, циклогексаноне, диметилформамиде, которые проверили на встречные примеси. Во всех исследованных растворителях были обнаружены ДЭФ, ДБФ и ДЭГФ на уровне 3–20 мкг/дм³. Наиболее чистым с точки зрения содержания фталатов оказался ТГФ, который, к тому же, хорошо смешивается с гексаном и метанолом, что важно для дальнейшей процедуры пробоподготовки.

Эффективность извлечения аналитов изучали на референтном материале – ПВХ с сертифицированным содержанием фталатов (CRM-PVC001). Чтобы обеспечить полное растворение образца в ТГФ, процедуру экстракции проводили в УЗ-поле – высокая эффективность УЗ-воздействий на процессы массопереноса подтверждена исследованиями (EPA Method 3550³³) и многолетним опытом аналитической работы.

Оптимальные условия экстракции аналитов (объём растворителя, время УЗ-воздействия и температура процесса) устанавливали экспериментально по результатам анализа нескольких образцов полимерных материалов на основе ПВХ при варьировании соответствующих параметров: объём ТГФ 5–20 см³; время экстракции 5–30 мин; температура экстракции 20–45 °С. Выбрали условия, которые гарантируют количественное извлечение аналитов даже при неполном растворении матрицы: объём ТГФ 10 см³; время экстракции в УЗ-поле 20 мин; температура экстракции 35 °С.

Учитывая специфику матрицы (полимер), рационально разработать процедуру очистки пробы от сопутствующих компонентов на основе изменения растворимости ПВХ в основном растворителе – в этом случае матрица осаждается в твёрдом виде под действием силы тяжести и/или центробежной силы. Исследовали два органических растворителя – гексан и метанол, эффективность процедуры оценивали визуально. В качестве осаждающего растворителя выбрали метанол, который обладает хорошей растворяющей способностью по отношению к аналитам. Применение метанола в комбинации с центрифугированием образца обеспечило полное осаждение матрицы на основе ПВХ.

После осаждения матрицы проба вновь становится гетерогенной системой, в которой с разной долей вероятности аналиты могут быть распределены между двумя фазами. Поэтому в пробоподготовку в качестве обязательного этапа до центрифугирования включили повторную экстракцию в УЗ-поле.

Инструментальные измерения градуировочных растворов и проб выполняли в выбранных условиях (см. выше). Уравнение расчёта массовой доли фталатов является традиционным для метода внутреннего стандарта:

$$w_{\text{ан } i, j} = \frac{S_{\text{ан } i, j} m_{\text{вн.ст } j}}{S_{\text{вн.ст } i, j} m_{\text{нав } j} RF},$$

где $w_{\text{ан } i, j}$ – массовая доля индивидуального фталата i -го измерения j -й навески (пробы); $S_{\text{ан } i, j}$, $S_{\text{вн.ст } i, j}$ – площади

³³ EPA Method 3550 "Ultrasonic Extraction": [сайт]. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3550c.pdf> (дата обращения 12.10.2022).

пиков фталата и внутреннего стандарта на хроматограмме в i -м измерении j -го экстракта; $m_{\text{вн.ст } j}$ – масса соответствующего внутреннего стандарта, внесённого в пробу; RF – относительный фактор отклика аналита; $m_{\text{нав } j}$ – масса j -й навески.

При девяти параллельных измерениях проб относительное стандартное отклонение результатов единичных измерений в условиях повторяемости составило не более 2 %.

Таким образом, каждый этап пробоподготовки был изучен отдельно с целью оптимизации процесса, и каждый этап процедуры измерений в целом был рассмотрен с точки зрения повышения точности результатов измерений. На основании проведённых исследований разработали алгоритм измерений, который объединил наилучшие, по мнению авторов настоящей статьи, решения. Алгоритм состоит из следующих шагов: взятие навески ПВХ (проба); растворение пробы в тетрагидрофуране; внесение в пробу изотопномеченных внутренних стандартов; осаждение полимерной матрицы путём изменения полярности растворителя (добавление метанола); экстракция аналитов с помощью УЗ-поля при нагревании; анализ экстракта методом газовой хроматографии с масс-спектрометрией в режиме регистрации выбранных ионов; обработка результатов измерений методом изотопного разбавления.

Разработанный алгоритм был документирован в виде проекта РМИ и далее использован для установления метрологических характеристик.

Установление метрологических характеристик РМИ.

В программе аттестации РМИ для подтверждения соответствия учитывали как общие, так и дополнительные (см. Приказ № 4091, п.п. 8, 12 и п.п. 9, 11, 12 соответственно) требования к референтной методике. Полученные экспериментальные данные обрабатывали в соответствии с [16] и ГОСТ Р 54500.3-2011 / Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008³⁴, ISO/IEC Guide 98-3:2008, РМГ 61-2010³⁵.

Неопределённость измерений массовой доли каждого аналита рассчитывали по модели измерений

$$w_{\text{ан}} = h \sum_{z=1}^9 w_{\text{ан } i, j} / 9, \quad (1)$$

где $w_{\text{ан}}$ – массовая доля аналита в пробе; $z=9$ – общее количество измерений; $h=1$ – безразмерный коэффициент, отражающий влияние переменных неконтролируемых факторов (в условиях промежуточной прецизионности) на результат измерения;

$$w_{\text{ан } i, j} = f_n \frac{S_{\text{ан } i, j} m_{\text{вн.ст } j}}{S_{\text{вн.ст } i, j} m_{\text{нав } j} RF}, \quad (2)$$

$f_n=1$ – коэффициент, характеризующий возможные искажения результата измерений на стадии пробоподготовки.

Относительная суммарная стандартная неопределённость u_c представляет собой сумму относительных стандартных неопределённостей по типам А, В:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}.$$

Неопределённость u_A обусловлена составляющими уравнения (1) и характеризует разброс результатов измерений, u_B – вклады входных величин уравнения (2), при этом вклады $S_{\text{ан } i, j}$, $S_{\text{вн.ст } i, j}$ имеют в основном случайный характер и содержатся в u_A :

$$u_B = \sqrt{u_{m_{\text{нав}}}^2 + u_{m_{\text{вн.ст}}}^2 + u_{RF}^2 + u_f^2},$$

где $u_{m_{\text{нав}}}$, $u_{m_{\text{вн.ст}}}$ – относительные стандартные неопределённости измерений масс навески и внутреннего стандарта соответственно; u_{RF} , u_f – относительные стандартные неопределённости, связанные с градуировочным фактором отклика RF и коэффициентом f_n соответственно.

Значение u_A оценивали на основании относительного СКО результатов эксперимента в условиях промежуточной прецизионности (условия: время, оператор). Данный показатель охватывает обе составляющие в уравнении (1). При вычислении $u_{m_{\text{нав}}}$ опирались на метрологические характеристики применяемых весов. При расчёте $u_{m_{\text{вн.ст}}}$ учитывали уравнение расчёта массы внутреннего стандарта:

$$m_{\text{вн.ст } j} = m_{\text{р.вн.ст } j} w_{\text{р.вн.ст } j};$$

$$u_{m_{\text{вн.ст } j}} = \sqrt{\left(\frac{u(m_{\text{р.вн.ст } j})}{m_{\text{р.вн.ст } j}} \cdot 100 \right)^2 + u_{w_{\text{р.вн.ст}}}^2},$$

где $m_{\text{р.вн.ст } j}$ – масса раствора внутреннего стандарта в пробе; $w_{\text{р.вн.ст}}$ – массовая доля внутреннего стандарта в растворе внутреннего стандарта.

Для расчётов принимали наименьшее значение $m_{\text{р.вн.ст } j}=1$ мкг, соответствующее нижней границе диапазона измерений РМИ (10 мг/кг). Составляющую, связанную с чистотой внутреннего стандарта, не учитывали исходя из постоянства его состава при градуировке и анализе.

Неопределённость u_{RF} оценивали на основе уравнений расчёта относительного фактора отклика:

$$RF = \sum_{k=1}^{k=2} \sum_{i=1}^{i=3} RF_{k, i} / n;$$

$$RF_{k, i} = \frac{S_{\text{ан } k, i} m_{\text{вн.ст } k}}{S_{\text{вн.ст } k, i} m_{\text{нав } k}},$$

где $RF_{k, i}$ – относительный фактор отклика при i -м измерении для k -го градуировочного раствора, $i=1, 2, 3$; $k=1, 2$;

³⁴ ГОСТ Р 54500.3-2011 / Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Неопределённость измерения. Руководство по выражению неопределённости измерения.

³⁵ РМГ 61-2010. ГСИ. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки.

Таблица 2

Бюджет неопределённости измерений массовой доли фталатов

Источник неопределённости u_c	Тип	u_c , %
Разброс результатов измерений в условиях промежуточной прецизионности с варьируемыми факторами (время, оператор), u_A	A	3,00
Измерение массы навески, $u_{m_{нав}}$	B	0,052
Измерение массы внутреннего стандарта, $u_{m_{вн.ст}}$	B	0,57
Установление и применение фактора отклика (одноточечная градуировка), u_{RF} , в том числе:	–	1,55
- разброс значений фактора отклика, u_n	A	0,82
Измерение массы аналита в градуировочном растворе, $u_{m_{ан.к}}$	B	1,17
Измерение массы внутреннего стандарта в градуировочном растворе, $u_{m_{вн.ст.к}}$	B	0,17
Возможная нестабильность фактора отклика, u_d	B	0,58
Возможные искажения результатов измерений при пробоподготовке, u_f	B	1,50
Относительная суммарная стандартная неопределённость $u_c = 3,74$ %		
Относительная расширенная неопределённость ($k=2$) $U_p = 7,48$ %		

Примечания:

1 Расчёт выполнен для диапазона измерений массовой доли индивидуальных фталатов 10–5000 мг/кг.

2 При усреднении трёх результатов, полученных в условиях промежуточной прецизионности, составляющая u_A уменьшается до 1,7 %, при этом $u_c = 2,9$ % и принимается $U_p = 6$ %.

n – общее количество i -х измерений k -х градуировочных растворов ($n=6$); $m_{вн.ст.к}$, $m_{ан.к}$ – массы аналита и внутреннего стандарта в k -м градуировочном растворе; $S_{ан.к,i}$, $S_{вн.ст.к,i}$ – площади пиков аналита и внутреннего стандарта.

Неопределённость u_{RF} рассчитывали как

$$u_{RF} = \sqrt{u_n^2 + u_{m_{ан}}^2 + u_{m_{вн.ст}}^2 + u_d^2},$$

где u_n – относительная стандартная неопределённость, обусловленная разбросом значений фактора отклика; u_d – относительная стандартная неопределённость, связанная с возможной нестабильностью фактора отклика в процессе анализа.

При оценивании u_n исходили из норматива на среднее квадратическое отклонение РМИ, равного 2 % при точечной градуировке.

Неопределённость $u_{m_{ан}}$ находили по формуле

$$u_{m_{ан}} = \sqrt{\left(\frac{(U_p)_{w_{ГСО}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{u_m}{m_{ГСО}} \cdot 100\right)^2 + \left(\frac{u_m}{m_{p1}} \cdot 100\right)^2 + \left(\frac{u_m}{m_{p1,k}} \cdot 100\right)^2},$$

где $(U_p)_{w_{ГСО}}$ – относительная расширенная неопределённость (при $k=2$, $P=0,95$), связанная со значением массовой доли аналита в стандартном образце; $m_{ГСО}$ – масса навески стандартного образца, взятой для приготовления стандартного раствора; m_{p1} – масса стандартного раствора; $m_{p1,k}$ – масса навески стандартного раствора, взятой для приготовления градуировочного раствора.

Для определения u_f использовали экспертную оценку сверху на основании анализа возможных, связанных с пробоподготовкой искажений результата измерений (в сторону увеличения из-за присутствия следов фталатов в применяемых растворителях и посуде или в сторону уменьшения в связи

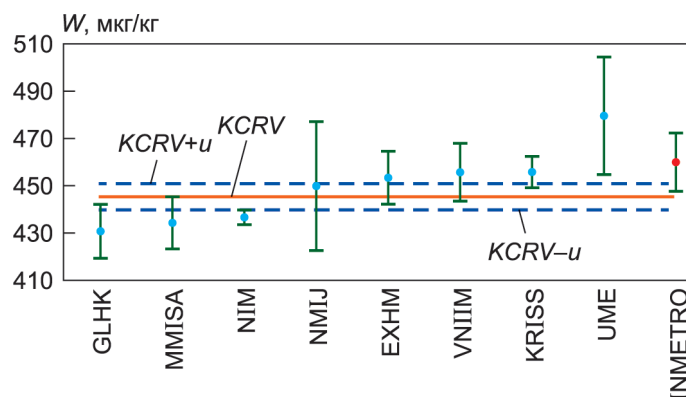


Рис. 2. Опорное значение (KCRV) и результаты измерений ди(н-бутил)фталата в поливинилхлориде, полученные участниками сличений CCQM-K133

Fig. 2. Reference value (KCRV) and measurement results of the comparison participants CCQM-K133

с неполным растворением навески анализируемого образца, либо неполным отделением фталатов от полимерной основы при её осаждении). Составляющие относительной суммарной стандартной неопределённости приведены в табл. 2.

Относительную расширенную неопределённость измерений вычисляли при коэффициенте охвата $k=2$ и уровне доверия 95 %. Обобщённые метрологические характеристики РМИ:

диапазон измерений массовой доли компонента 10–5000 мг/кг;

относительное СКО результатов единичных измерений в условиях повторяемости 2 %;

относительное СКО результатов девяти единичных измерений, выполненных в условиях повторяемости, в условиях промежуточной прецизионности 3 %;

принятая относительная расширенная неопределённость измерений 8 % (расчётная 7,8 %) соответствует границам относительной суммарной погрешности измерений при доверительной вероятности $P=0,95$.

Внешним и объективным подтверждением соответствия разработанной РМИ являются результаты международных ключевых сличений CCQM-K133 "Phthalate esters in Polyvinyl Chloride (PVC)" – «Эфиры фталевой кислоты в поливинилхлориде (ПВХ)», в которых ВНИИМ принимал участие в 2018–2019 гг. Дизайн сличений предполагал измерение содержания трёх приоритетных фталатов (ДБФ, бензилбутилфталата и ДЭФ) в гранулах ПВХ. Результаты измерений ДБФ разных национальных метрологических институтов – участников сличений – приведены на рис. 2. Результаты измерений ВНИИМ хорошо согласуются с принятым опорным значением и результатами измерений других участников.

Разработанная во ВНИИМ в рамках сличений CCQM-K133 технология аттестации чистых веществ была использована для создания СО состава раствора приоритетных фталатов [13], а аналитическая процедура измерений была положена в основу РМИ.

Заключение. Разработанная и аттестованная РМИ ВНИИМ-243-01-2019 объединила лучшие аналитические и метрологические решения. Впервые наша страна получила инструмент, позволяющий не только выполнять измерения фталатов с наивысшей в Российской Федерации точностью, но и легитимно разрешать спорные вопросы/ситуации, возникающие между производителями и потребителями полимерной продукции.

Список источников / References

1. EPA Method 606 – Phthalate ester, U.S. Environmental Protection Agency, 1984, 20 p.
2. Canadian Environmental Protection Act Bis(2-ethylhexyl) phthalate. Priority substances list. Assessment Report, 1994. 29 p.
3. European Union Scientific Committee on Toxicology, Ecotoxicology and the Environment European Commission Decision 1999/815/EC, *Official Journal of the European Communities*, 1999, L315, vol. 42, pp. 46–49.
4. Майстренко В. Н., Ключев Н. А. Эколого-аналитический мониторинг стойких органических загрязнителей. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 323 с. [Maistrenko V. N., Klyuev N. A., *Ecological and analytical monitoring of persistent organic pollutants*, Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2004, 323 p. (In Russ.).]
5. RECOMMENDATIONS Commission Recommendation (EU) 2019/794 of 15 May 2019 on a coordinated control plan with a view to establishing the prevalence of certain substances migrating from materials and articles intended to come into contact with food, *Official Journal of the European Union*, 2019, L129/37, vol. 62, pp. 1–89.
6. Ghada Zaki, Tamer Shoeib, *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 618, pp. 142–150.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.337>

7. Qiong Luo, ZeHua Liu, Hua Yin, Zhi Dang, Neng-wu Zhu, Zhang Lin, Yu Liu, *Water Research*, 2018, vol. 147.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.002>

8. Маркова О. Л., Ганичев П. А., Еремин Г. Б., Зарицкая Е. В. Миграция фталатов из упаковочных материалов для бутилированной воды. Результаты международных исследований // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. 2020. Т. 15. № 1. С. 416–427 [Markova O. L., Ganichev P. A., Yeremin G. B., Zaritskaya E. V., Phthalate migration from packing materials for bottled water. Findings of international studies, *Health is the basis of human potential: problems and ways to solve them*, 2020, vol. 15, no 1, pp. 416–427].

9. Бродский Е. С., Шелепчиков А. А., Агапкина Г. И. и др. Сложные эфиры фталевой кислоты в почвах Москвы // Вестник Московского Университета. Сер. 17. Почвоведение. 2019. № 2. С. 44–48 [Brodskiy E. S., Shelepchikov A. A., Agapkina G. I., Tikhonova M. O., Paramonova T. A., Lipatov D. N., Content of phthalates esters in soils of Moscow-city, *Bulletin of the Moscow University, Soil science*, 2019, no. 2, pp. 44–48. (In Russ.).]

10. Горшков А. Г., Бабенко Т. А., Кустова О. В. и др. Приоритетные фталаты в пелагиали и прибрежной зоне оз. Байкал // Химия в интересах устойчивого развития. 2017. № 4. С. 375–383. <https://doi.org/10.15372/KhUR20170403> [Gorshkov A. G., Babenko T. A., Kustova O. V., Izosimova O. N., Shishlyannikov S. M., *Chemistry for Sustainable Development*, 2017, no. 4, pp. 351–359. <https://doi.org/10.15372/CSD20170403>].

11. De Bièvre P., *Analytical Proceedings*, 1993, no. 30, pp. 328–333. <https://doi.org/10.1039/AP9933000328>

12. Milton M. J. T., Quinn T. J., *Metrologia*, 2001, vol. 38, no. 4, 289. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/38/4/1>

13. Крылов А. И., Михеева А. Ю., Будко А. Г. и др. Метрологическое обеспечение измерений содержания фталатов: стандартный образец состава раствора шести приоритетных фталатов в метаноле // Эталон. Стандартные образцы. 2021. № 17(3). С. 5–19. <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2021-17-3-5-19> [Krylov A. I., Mikheeva A. Y., Budko A. G., Tkachenko I. Yu., Metrological support of phthalate content measurements: reference material for the composition of a solution of six priority phthalates in methanol, *Measurement Standards. Reference Materials*, 2021, vol. 17, no. 3, pp. 5–19. (In Russ.).]

14. Fankhauser-Noti A., Grob K., *Anal. Chem. Acta.*, 2007, vol. 582, no. 2, pp. 353–360. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.09.012>

15. БЭС – Большой энциклопедический словарь. Химия. М.: Научное издательство «Большая Российская Энциклопедия», 2000. 790 с. [BES – *Bol'shoj enciklopedicheskiy slovar'. Himiya* [A large encyclopedic dictionary. Chemistry], Moscow, Scientific publishing house "Bol'shaya Rossijskaya Enciklopediya", 2000, 790 p. (In Russ.).]

16. Руководство ЕВРАХИМ / СИТАК. Количественное описание неопределённости в аналитических измерениях: Пер. с англ. Р. Л. Кадиса, Г. Р. Нежиховского, В. Б. Симины под общ. ред. Л. А. Конопелько. 3-е изд. СПб: НПО «Профессионал», 2016. 149 с. [EURACHEM / CITAC Guide CG 4. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement, Third Edition, 2012].

Статья поступила в редакцию 02.06.2022; одобрена после рецензирования 15.06.2022; принята к публикации 16.06.2022.
The article was submitted 02.06.2022; approved after reviewing 15.06.2022; accepted for publication 16.06.2022.



Научно-технический журнал «Измерительная техника»

Тарифы на подписку и размещение рекламы

в 2023 году

Модульная реклама

Полноцветная печать

Формат издания 60x90 1/8 (обрезной формат 220x290 мм, полоса набора 190x255 мм)

Обложка	Цена*, руб.
2-я сторона 1/1	33 720
3-я сторона 1/1	33 720

*Цена указана с НДС 20 %

Подписка через редакцию

Наименование СМИ	Форма распространения	Номеров в год	Цена*, руб.		
			Один номер	Полгода	Год
Измерительная техника	Печатная	12	850	5 100	10 200
Измерительная техника	Электронная копия	12	830	4 980	9 960
Метрология**	Электронная копия	4	320	640	1 280

*Цена указана с НДС 20 %

**Электронные копии архивных номеров 2014–2021 гг.; в 2014 г. – 12 номеров в год

Контакты:

Размещение рекламы: +7(495)781-28-76 | bychkov@vniims.ru

Подписка: +7(495)430-28-02 | kersova@vniims.ru

Онлайн-заявка: www.vniims.ru

ПОДПИСКА – 2023

на ежемесячный научно-технический журнал
«Измерительная техника»

(печатное издание и электронная копия)

- ▶ онлайн на сайтах подписных агентств
- ▶ в редакции

ГК «Урал-Пресс»

«Измерительная техника»

38168 (печатное издание)

013315 (электронная копия)

www.ural-press.ru

☎ +7 (495) 789-86-36; +7 (499) 700-05-07

Агентство по распространению зарубежных изданий

www.arzi.ru

☎ +7 (495) 680-89-87; +7 (495) 631-62-55

✉ secret@arzi.ru

Агентство «Книга-Сервис»

- интернет-каталог «Пресса по подписке» www.akc.ru
- объединённый каталог «Пресса России» www.pressa-rf.ru

☎ +7 (495) 631-62-54

✉ podpiska@pressa-rf.ru

Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU www.elibrary.ru

Электронно-библиотечная система «РУКОНТ» www.lib.rucont.ru

Подписка в редакции
на номера текущего года и архивные номера 2016–2021 гг.

- ▶ по телефону +7 (495) 430-28-02
- ▶ по электронной почте kersova@vniims.ru
- ▶ на сайтах www.vniims.ru, www.izmt.ru

Адрес редакции:

119361 Москва, ул. Озёрная, 46, ФГБУ «ВНИИМС»

☎ +7 (495) 781-48-70

✉ izmt@vniims.ru

www.izmt.ru